Б.С. Степанов, Р.К. Яфязова

СЕЛЕВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

СЕЛЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ И СЕЛЕТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

АО «Национальный научно-технологический холдинг “ПАРАСАТ”»

Институт географии

СЕЛЕВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

Том 3

Б. С. Степанов, Р. К. Яфязова

СЕЛЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ И СЕЛЕТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Алматы
2014

УДК551.3+627
ББК 26.222.5/38.777
С 29

Утверждено к печати Ученым советом
ТОО «Институт географии» АО «ННТХ “Парасат”»

Под редакцией

доктора географических наук, профессора
А. Р. МЕДЕУ

Рецензенты:

доктор географических наук, профессор *А. П. ГОРБУНОВ*
доктор географических наук *В. П. БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ*

С 29 Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: В 4-х томах. – Алматы, 2014.

ISBN 978-601-7150-71-6

Т. 3. **Степанов Б. С., Яфязова Р. К.** Селевые процессы и селетехнические сооружения. – 2014. – 434 с.

ISBN 978-601-7150-72-3

Рассмотрены природа селей, воздействие природных и антропогенных факторов на развитие селевых процессов, реология селевой массы, основные закономерности зарождения, формирования и отложения селей; дана оценка степени селевой опасности. Описаны противоселевые мероприятия и селетехнические сооружения, а также предложена концепция защиты от селей на северном склоне Иле Алатау в условиях изменяющегося климата.

Книга рассчитана на специалистов научных и проектных организаций, занимающихся решением проблем, связанных с защитой от селей. Она может быть полезна студентам, аспирантам и преподавателям высших учебных заведений.

Библиогр. 291 назв. Ил. 216. Табл. 34.

УДК 551.3+627
ББК 26.222.5/38.777

ISBN 978-601-7150-72-3 (т. 3)
ISBN 978-601-7150-71-6 (общ.)

© Институт географии, 2014
© Степанов Б. С., Яфязова Р. К., 2014

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

JSC «National scientific and technological holding "PARASAT"»

Institute of geography

DEBRIS FLOWS IN THE SOUTHEAST KAZAKHSTAN

Volume 3

Boris S. Stepanov & Roza K. Yafyazova

DEBRIS-FLOW PROCESSES AND COUNTERMEASURES AGAINST DEBRIS-FLOW HAZARDS

Almaty
2014

UDC 551.3+627
LBC 26.222.5/38.777
D 29

Approved for publication by Scientific Council
of the «Institute of Geography» LLP of the «"Parasat" NSTH» JSC

E d i t e d b y

Professor, Doctor of Science in Geography
A. R. MEDEU

R e v i e w e r s:

Professor, Doctor of Science in Geography *A. P. GORBUNOV*
Doctor of Science in Geography *V. P. BLAGOVESHENSKY*

D 29 *Debris flows in the Southeast Kazakhstan:* Set of four volumes. Almaty: 2014.

ISBN 978-601-7150-71-6

Vol. 3. Stepanov, B.S. & Yafyazova, R.K. *Debris-flow processes and countermeasures against debris-flow hazards*. Vol. 3, 434 p. Almaty: 2014.

ISBN 978-601-7150-72-3

Nature of debris flows, influence of natural and anthropogenic factors on debris-flow processes, rheology of debris-flow mass, main regularities of initiation, formation and deposition of debris flows were considered. Assessment of debris-flow hazard was given. Countermeasures against debris-flow hazards were described, and the concept for protection against debris-flow hazards on the northern slope of the Zailiysky Alatau (nowadays the Ile Alatau) Mountains Range under the climate warming was suggested.

The book is intended for scientific and design institutions connected with protection against debris-flow hazards. It can be used by students, post-graduate students, and lecturers.

291 References, 216 Figures, 34 Tables.

UDC 551.3+627
LBC 26.222.5/38.777

ISBN 978-601-7150-72-3 (Vol. 3)
ISBN 978-601-7150-71-6 (Set of four vol.)

© 2014 Institute of Geography
© 2014 Stepanov B.S. & Yafyazova R.K.

От редактора

Книга «Селевые процессы и селетехнические сооружения» является третьим томом монографии «Селевые явления Юго-Восточного Казахстана». Авторами книги обобщен опыт, в том числе собственный, изучения закономерностей формирования селей и организации противоселевых мероприятий.

Изложение материала в четырех томах монографии «Селевые явления Юго-Восточного Казахстана» построено в соответствии с задачами, стоявшими перед авторами монографии. Этим объясняется и несколько иной подход к содержанию главы *2*, посвященной описанию факторов селеформирования, а также главы *11*, где дано описание селетехнических сооружений, нежели в первом томе монографии.

Основное внимание при написании этого тома уделялось научному обоснованию расчета характеристик селей и оценке состояния мероприятий, направленных на уменьшение или предотвращение ущерба, наносимого селевыми потоками, а также их перспективе.

Большое внимание в книге уделено реологии селевой массы (глава *3*). Без глубокого понимания сущности реологических свойств селевой массы невозможны адекватное описание механизмов селеформирования (глава *4*) и основных кинематических и энергетических характеристик селевого потока (глава *6*), моделирование селей и разработка теории существования селевой массы.

Ожидать в обозримом будущем существенного изменения состояния теории селевых процессов нет оснований, поэтому главным источником знаний, которые могут быть использованы в практике защиты от селей, остаются результаты наблюдений за селями в природных условиях или при их искусственном воспроизведении, рассматриваемых как полномасштабное моделирование. Эти вопросы нашли отражение в главе *5*.

В результате проведенных шамалганских и аксайских экспериментов получены уникальные данные, позволившие открыть и объяснить явление скачкообразного изменения плотности селевой массы. Стало возможным математическое описание не только селеформирования в селевом очаге, но и трансформации селевого потока на всем пути его движения (процессов набора, распада и отложения, включая остановку на конусе выноса) с расчетом основных характеристик в любом расчетном створе. Несмотря на дискуссионный характер некоторых положений разрабатываемой теории существования селевой массы, она является ключевым элементом теории трансформации характеристик селей. На их основе разработана базовая модель селевого процесса. Она описывает селевой процесс, инициируемый гляциальными и прорывными паводками, дождевого генезиса: при подключении блока, описывающего формирование ливневого паводка на

водосборе селевого бассейна, а также оползневого генезиса: при подключении блока, описывающего механизм сдвижения водонасыщенных грунтов (главы *7* и *8*).

Втора часть книги посвящена проблеме оценки селевой опасности и мероприятиям, обеспечивающим минимизацию потерь от селей. К сожалению, методология оценки селевой опасности до настоящего времени остается белым пятном селеведения, что значительно снижает уровень научного обоснования надежности защиты от селей (глава *9*).

Опыт, накопленный при опорожнении моренных озер в Казахстане, уникален. Его достоверное изложение и результаты критического анализа могут внести значительный вклад в увеличение эффективности и безопасности превентивных опорожнений селеопасных поверхностных водоемов моренно-ледниковых комплексов (глава *10*).

Стратегия защиты от селей в Казахстане базировалась на гипотезе об исключительно редкой повторяемости жидких осадков, способных привести к формированию катастрофических селей. Считалось, что основную опасность представляют сели гляциального генезиса, характеристики которых и использовались при обосновании технических характеристик проектируемых селетехнических сооружений (глава *11*). В этой главе приведены фотографии и основные характеристики этих сооружений. Обращается внимание на ошибочные представления о том, что сквозные сооружения обладают избирательной способностью к задержанию крупных частиц, а также на необходимость учета особенностей движения селей при проектировании инфраструктуры в горных долинах. Описание систем оповещения о селевой опасности и их критический анализ приведены в главе *12*.

Сделан вывод об успешности мероприятий по защите от селей, осуществленных в Казахстане за последние 50 лет.

Результаты исследований, выполненных в последние десятилетия, свидетельствуют о ключевой роли климата в селевой активности в горных системах средних широт, несущих в настоящее время оледенение. Развитие палеоселеведения – нового направления в селеведении, позволило установить, что селевая активность практически полностью угасает в ледниковые эпохи и достигает максимума в межледниковые эпохи, когда температура воздуха превышает современное значение на 2–3 ºС. В таких условиях, по мнению авторов, селевая активность в XXI веке может в десятки раз превысить значения, характерные для климата XX века. В монографии изложена концепция защиты от селей г. Алматы и других крупных населенных пунктов, расположенных у подножия Иле Алатау, в условиях потепления климата (глава *13*).

Несмотря на дискуссионный характер некоторых положений книги, она отражает современный уровень научных исследований в рассматриваемой области селеведения и окажется полезной широкому кругу специалистов.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Хозяйственное освоение горных и предгорных районов Юго-Восточного Казахстана происходило в условиях практически полного отсутствия научного обоснования степени угрозы, обусловленной образованием катастрофических селей. Объясняется это молодостью науки о селях, отсутствием селей гляциального генезиса до середины XX века и относительно редкой повторяемостью катастрофических селей дождевого генезиса. Условия для формирования катастрофических селей гляциального генезиса в горных районах Казахстана созрели лишь к середине XX века. Все это привело к тому, что основные населенные пункты, в том числе г. Алматы (основанные во второй половине XIX века), расположены на конусах выноса горных рек – территориях, характеризующихся не только наиболее благоприятными условиями для жизни и хозяйственной деятельности, но и подверженных опасности катастрофических селей.

Несмотря на то, что всемирная история борьбы с негативными проявлениями селевой деятельности насчитывает много столетий, планомерное изучение условий образования и механизмов формирования селей, механики их движения и остановки, отложения на конусах выноса и в селехранилищах, взаимодействия селей с инженерными сооружениями началось только в середине XX века.

Колоссальные по масштабам сели и оползни сейсмического происхождения 1887 г. в Иле Алатау, катастрофический дождевой сель 1921 г., разрушивший восточную часть г. Алматы, гляциальные сели 1958 и 1963 гг., нанесшие большой ущерб г. Есику, ускорили осознание необходимости проведения мероприятий, направленных на предотвращение гибели людей и большого материального ущерба, наносимого селями. События 1973 г. подтвердили своевременность принятия мер по защите от селей г. Алматы и других населенных пунктов.

Угроза разрушения селевыми потоками населенных пунктов (с общей численностью населения, приближающейся к 2 млн), расположенных на предгорной равнине, обусловила активизацию научно-исследовательских и проектных работ, в которых принимали участие Институт геологии им. К. И. Сатпаева и Институт географии АН КазССР, Казахский научно-исследовательский институт энергетики Министерства энергетики и электрификации СССР, Казахский научно-исследовательский гидрометеорологический и Государственный гидрологический институты Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, Казахский филиал института «Гидропроект» им. С. Я. Жука и другие организации.

Основными направлениями исследований стали оценка взаимовлияния основных факторов селеформирования (геоморфологического, геологического, гидрометеорологического) на масштабы и частоту повторения селей; реология селевой массы; физическое и математическое моделирование селей, результаты которых нашли применение при расчете характеристик селей, необходимых при проектировании противоселевых сооружений; разработка нормативных документов, регламентирующих проектирование, строительство и эксплуатацию селезащитных сооружений; разработка методов прогноза селей различного генезиса и средств оповещения о селевой опасности. Создавалась научная база проектирования селезадерживающих, селепропускных, селенаправляющих сооружений, воплощение которых осуществлялось ГУ «Казселезащита». Эта же организация проводила превентивное опорожнение селеопасных озер моренно-ледниковых комплексов [1].

Последние десятилетия характеризуются значительным усилением внимания к проблемам оценки селевой активности, селевого риска, оценки роли климата в селевой активности, разработки стратегии защиты от селей в условиях изменяющегося климата, а также основ управления селевыми процессами.

Книга состоит из двух частей. Первая отражает, по мнению авторов монографии, уровень современных знаний в той части науки о селях, которая является базовой не только при расчете характеристик селей, использующихся при проектировании различного рода селезащитных сооружений, проектировании автомобильных и железных дорог, электрических линий и линий связи, мостов, направляющих дамб, каналов и других объектов в горных районах, но и при разработке стратегии и тактики борьбы с селевыми явлениями, управлении селевыми процессами, прогнозе селей, оценке риска и т.д. Это генезис селей, закономерности воздействия природных и антропогенных факторов на развитие селевых процессов в селевых бассейнах, основные сведения о компонентах селевой массы, ее предельной плотности и реологических свойствах. Относительно большой объем в монографии отведен описанию условий формирования и механизма водоледяного селя. Объясняется это тем, что в русскоязычной литературе, в том числе в «Гляциологическом словаре» и терминологическом словаре «Селевые явления», под термином «водоледяной сель» понимаются другие явления или физика явления в них слишком упрощена. Значительный практический интерес это явление представляет потому, что водоледяной сель образуется на малых уклонах (характерных для конусов выноса, на которых расположены крупные населенные пункты, в том числе г. Алматы) при температуре воздуха минус 15–25 ºС. Расход селя может составлять сотни кубометров в секунду при расходе воды в реке 1–1,5 $м^3/с$, что представляет большую опасность в городских условиях.

Более сложной для восприятия может оказаться глава, посвященная изложению основ теории существования селевой массы. Однако затраченные усилия будут вознаграждены открывающейся красотой не известного ранее природного явления и обретением уверенности в глубоком понимании природы селевых явлений.

Вторая часть книги посвящена изложению сведений о селезащитных сооружениях, призванных защитить населенные пункты, расположенные на предгорной равнине, примыкающей к северному склону Иле Алатау. Стратегия защиты г. Алматы базировалась на представлении о редкой повторяемости катастрофических селей дождевого генезиса. В связи с потеплением климата необходим своевременный пересмотр стратегии защиты от селей, в основу которой должны быть положены результаты оценки селевого риска, учитывающего политический и социально-экономический факторы как минимум на столетнюю перспективу. Приведены рекомендации по защите г. Алматы от селей в условиях многократного увеличения селевой активности в XXI веке, обусловленного потеплением климата.

В процессе работы над этой книгой в той или иной степени использованы материалы исследований Ю. Б. Виноградова, Т. С. Степановой, В. Н. Вардугина, Л. Н. Гавришиной. Авторы выражают им искреннюю благодарность, а также сотрудникам отдела селей Казахского научно-исследовательского гидрометеорологического института и его руководителям. В качестве иллюстраций использовались фотоматериалы из архивов КазНИГМИ, РГП «Казгидромет» и ГУ «Казселезащита».

Особую признательность авторы выражают:

Директору Института географии, д.г.н., профессору А. Р. Медеу за приглашение принять участие в написании коллективной монографии «Селевые явления Юго-Восточного Казахстана», а также за труд по общей редакции монографии и полезные предложения по улучшению ее содержания.

Д.т.н., профессору Ю. Б. Виноградову за создание в отделе селей Казахского научно-исследовательского гидрометеорологического института творческой и дружественной обстановки, благодаря которой в 1972–1978 гг. научными сотрудниками самых разных специальностей были осуществлены уникальные эксперименты по воспроизведению в реальных условиях полномасштабных селей. Результаты этих экспериментов войдут в историю селеведения.

Начальнику ГУ «Казселезащита» МЧС РК к.т.н. М. Т. Нурланову за активную поддержку научных исследований, обеспечивающих оптимизацию превентивного опорожнения селеопасных озер моренно-ледниковых комплексов.

Сотрудникам СКБ завода «Казгеофизприбор» В. А. Красюкову, П. М. Коваленко, М. Я. Новикову, В. П. Попову, В. М. Силлеру за большой вклад в разработку комплекса приборов для бесконтактного измерения характеристик селей.

Сотрудникам отдела селей Казахского научно-исследовательского гидрометеорологического института Н. М. Нестеркину, А. Х. Хайдарову, А. Г. Щеколдину и др. за разработку и изготовление приборов для измерения реологических характеристик селевой массы.

К.ф.-м.н. Т. С. Степановой, результаты исследований которой широко использовались при написании этой монографии.

К.г.-м.н. В. Н. Вардугину, чьи труды по изучению гранулометрического и минералогического составов селеформирующих пород сыграли неоце-

нимую роль в становлении реологии селевой массы. Скрупулезность его полевых исследований может быть эталоном служения науке.

К.ф.-м.н. Л. Н. Гавришиной за большой вклад в развитие реологии селевой массы.

Проектировщикам селезащитных сооружений И. Я. Вильковискому, Ю. Н. Зиневичу, Л. В. Спицину, Н. А. Осиповой и др., сумевшим в условиях ограниченности научного обоснования, времени и средств, выделявшихся на проектирование и строительство селехранилищ, обеспечить безопасность населения, проживающего у подножия Иле Алатау, в XX веке.

Ч а с т ь I

СЕЛЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 1

ПРИРОДА СЕЛЕЙ

Сель, силь (арабск. – бурный поток) по определению Большой Советской Энциклопедии – внезапно возникающий на горных реках бурный паводок, несущий очень большое количество наносов как в виде мелких частиц (грязевые сели), так и в виде гальки и камней (грязекаменные сели) [2].

В Руководстве по организации и проведению работ по изучению селей на территории Республики Казахстан [3] сель (селевой поток) трактуется как «русловое движение селевой смеси, сопровождающееся вовлечением в селевой процесс твердых частиц грунтов, вмещающих русло, либо отложением селевой массы или ее компонентов».

В работе [4] под селем понимается «... совокупность русловых движений масс горных пород, происходящих без нарушения сплошности среды и сопровождающихся разрушением и вовлечением в селевой процесс рыхлообломочных пород, вмещающих русла, а также частичным отложением в последних селевых масс или их компонентов». Существуют и другие определения селя (селевого потока) [5–7].

Определение селя, приведенное в Большой Советской Энциклопедии, было сформулировано в середине XX века, когда о природе селей было известно очень немного. В настоящее время можно уверенно говорить о том, что термины «внезапно возникающий», «бурный паводок» и «возникающий на горных реках» не всегда правомерны. При проведении экспериментов по искусственному воспроизведению селей время зарождения селя задавалось согласно плану работ. Время образования селя дождевого генезиса в очагах рассредоточенного селеобразования можно предсказать, имея информацию о продолжительности и интенсивности дождя. Далеко не обязательно, что сель – это бурный паводок. Так, во время селя 1975 г. на р. Улькен Алматы (Иле Алатау) поток представлял собой движение плотной грязекаменной массы, оставлявшей на берегах четкие границы наивысшего уровня. Сели возникают не только «на горных реках», но и в пустынях.

Поведение селевого потока определяется плотностью и реологическими свойствами селевой массы (упругостью, вязкостью, пластичностью), расходом и объемом селя, морфометрическими характеристиками пути его движения. Продолжительность селевых процессов варьирует от нескольких минут до нескольких (с перерывами) суток. Расход селей изменяется от долей до нескольких десятков тысяч кубометров в секунду. Максимальный расход селевого потока 15 июля 1973 г. в бассейне р. Киши Алматы, по разным оценкам, составлял 5–10 тыс. $м^3/с$ [8, 9]. Плотность селевой массы, даже в течение одного процесса, колеблется в широком диапазоне – от 1100 до 2400 $кг/м^3$ и более. Твердый компонент селевой массы может

состоять из частиц горных пород различной величины: от долей микрона до 10 м и более. Их плотность может изменяться от 2660 до 2710 кг/м^3 для кислых и от 2720 до 3190 кг/м^3 для основных магматических пород, от 2070 до 4000 кг/м^3 для метаморфических пород и от 1730 до 3670 кг/м^3 для осадочных пород.

Селевой массе в той или иной степени присущи основные реологические свойства: упругость, вязкость и пластичность. Их величины определяются химическим составом и концентрацией глинистых или других коллоидных частиц, концентрацией и гранулометрическим составом более крупных частиц в селевой массе. В селевой массе с ярко выраженными вязкопластическими свойствами возможно перемещение валунов весом несколько тонн в квазивзвешенном состоянии. Широко распространенное представление о том, что глыбы (весом в несколько десятков тонн) транспортируются селевым потоком, в большинстве ситуаций неверно. Перемещение крупных частиц в плотной селевой массе, даже на малых уклонах, происходит за счет их потенциальной энергии.

Скорость селевых потоков может изменяться в широких пределах – от 2 до 400 км/ч [10, 11]. Течение может быть турбулентным, при этом поток окутывается облаком, состоящим из мельчайших частиц грязи, осаждающихся на почве и растительности на расстоянии нескольких десятков метров от потока [8], и квазиламинарным, при этом поток оставляет на берегах четкие границы [11].

Для формирования селей необходимо сочетание трех факторов: наличия рыхлообломочных пород, воды и уклона. Причины и механизмы зарождения селей многообразны. Это эрозионные и сдвиговые процессы, возникающие в результате выпадения ливней и затяжных дождей, интенсивного таяния снега и льда, прорыва водоемов, землетрясений и извержения вулканов, обводнения грунтовых и снежных масс, а также хозяйственной деятельности человека и т.д.

Различия в механизмах формирования селей наиболее выражены в начальной фазе селеобразования. Первичная селевая масса образуется либо в результате захвата водным потоком рыхлообломочных пород, либо при сдвиге водонасыщенных рыхлообломочных пород под действием силы тяжести и их последующем разжижении. После того как селевая масса начнет перемещаться в русле, дальнейший процесс ее формирования унифицируется: обогащение селевой массы происходит за счет как захвата рыхлообломочных пород в ходе эрозионного воздействия потока на русло, так и сдвига, а также обрушения в прирусловую область в той или иной степени увлажненных пород, потерявших устойчивость вследствие углубления русла или подрезки берегов селевым потоком.

Индивидуальность селевых потоков обусловлена степенью увлажнения рыхлообломочных пород, геологическим и морфологическим строением селевых очагов. При очень высокой степени увлажнения рыхлообломочных пород возможно развитие цепного селевого процесса, при котором характеристики селей, в частности расход, могут на порядки превышать характеристики водного паводка, инициировавшего сель [12].

1.1. Генезис селей

Как природное явление потоки, состоящие из воды и твердых частиц, появились одновременно с возникновением воды на поверхности Земли. Наиболее благоприятные условия для их зарождения и развития создавались, скорее всего, в зонах вулканической деятельности: достаточная протяженность крутых склонов, легко поддающийся эрозии рыхлообломочный покров (пепел, обломки горных пород), вода, обусловленная атмосферными явлениями или собственно вулканической деятельностью. Активизации селей способствовали и тектоническая деятельность, формировавшая горные системы, а также глобальные изменения климата, обусловившие существование ледниковых и межледниковых эпох в ледниковые периоды. Сели выполняли не только функцию переноса наносов из верхних ярусов накопления на относительно более низкие ярусы, но и становились причиной ухудшения условий существования растительного и животного мира.

С появлением *Homo sapiens* обсуждаемое природное явление стало восприниматься как осознанно опасное и получило название, позволявшее идентифицировать его в ряду других опасных явлений. В русской литературе за ним закрепился термин «сель». На языках народов мира существует множество определений селя, которые в переводе на русский язык характеризуют некоторые особенности этого природного явления (бурный, внезапный, стремительный, катастрофический, временный, горный и др.). Селевые явления столь многогранны, что всем из перечисленных выше характеристик (за исключением, пожалуй, «временный») в реальных условиях можно найти полную противоположность, при этом сущность селя остается неизменной.

В общем случае сель – это движение смеси воды и твердого компонента (рыхлообломочные породы, лед, снег, продукты хозяйственной деятельности человека и т.д.) по поверхности суши или гравитационное придонное течение смеси воды и мелких фракций горных пород в морях и океанах под действием сил тяжести и инерции. Селевая масса может содержать и воздух, однако данные о его содержании в различных условиях отсутствуют (как и сведения о влиянии воздуха на реологические свойства селевой массы) и поэтому не рассматриваются. В зависимости от того, что представляет собой основная масса твердого компонента, сели могут подразделяться на грязевые, грязекаменные, водоснежные, водоледяные, мутьевые и другие. Общепринятые количественные критерии этих определений отсутствуют, поэтому они используются при качественном описании многокомпонентных потоков.

Селевые процессы граничат, с одной стороны, с паводками, транспортирующими значительные объемы наносов, с другой – с оползнями. В этой работе под селем будем понимать совокупность движения масс горных пород (происходящих без нарушения сплошности среды с вовлечением в селевой процесс рыхлообломочных пород и частичным их отложением) под действием силы тяжести или инерции при условии равенства или превы-

шения в общем энергетическом балансе доли потенциальной энергии твердого компонента. При средней плотности твердых частиц 2650 кг/м^3 и одинаковой скорости движения воды и твердого компонента такое равенство наступает при плотности селевой массы 1456 кг/м^3.

Это определение также не носит универсальный характер, так как при оценке степени ответственности инженеров-геотехников за ущерб, нанесенный селем или водным паводком, содержащим большое количество наносов, определить плотность массы потока практически невозможно из-за различной скорости движения жидкого компонента и твердых частиц (при относительно невысоких их концентрациях). При расчете ущерба, нанесенного этими потоками, к селям, по нашему мнению, целесообразно относить потоки, основной ущерб от которых обусловлен наличием в нем твердого компонента.

От оползней сели отличаются тем, что при движении оползней нарушается сплошность среды, что проявляется в растрескивании оползневого тела и даже смещении его блоков друг относительно друга.

Ареалы распространения селей на поверхности суши не являются случайными, они закономерно связаны с главными факторами селеформирования: климатическим, геологическим и геоморфологическим. Главным среди них является климатический фактор уже хотя бы потому, что при температуре воды ниже 0 °С пресная вода превращается в лед.

1.1.1. Сели дождевого генезиса

Сели дождевого генезиса вызываются ливневыми жидкими осадками, интенсивность и слой которых превышают критические значения [13–17]. Небольшие сели формируются в Иле Алатау в среднегорной зоне. Наиболее известными очагами рассредоточенного селеобразования среднегорной зоны являются Кокчека (бассейн р. Улькен Алматы) и Акжар (бассейн р. Аксай). Сели формируются в ходе выпадения дождей, максимальные расходы не превышают первых десятков кубометров в секунду. Ущерб, наносимый этими селями, невелик и складывается в основном из затрат на расчистку дорог от селевой массы. Отложение или распад селевой массы происходят в руслах рек и примыкающих к ним (в среднегорной зоне) конусах выноса.

Мощные сели дождевого генезиса в Иле Алатау образуются при выпадении ливневых дождей в высотной зоне 3000–4000 м над уровнем моря. В этой зоне находятся скалы и ледники, обладающие коэффициентом стока, близким к единице, крутопадающие склоновые отложения, представленные несцементированными рыхлообломочными породами, осыпи, морены и т.д. Провальная фильтрация рыхлообломочных пород и подземные каналы стока способствуют аккумуляции воды в грунтах, создавая условия для их сдвига и реализации цепных селевых процессов.

Зоной формирования дождевых селей могут быть как большие площади эродированных поверхностей (адыры, поверхности скольжения крупных обвалов, где образуются очаги рассредоточенного селеобразования),

так и линейные образования (врез, рытвина и т.д. – очаги сосредоточенного селеобразования).

Формирование селей в очагах рассредоточенного селеобразования. Рассредоточенное формирование селей характерно для эродированных водосборов низкогорных зон, например Чуст-Папских адыров (рисунок 1.1), сложенных мощными толщами плотных мергелистых суглинков, глин, песчаников и т.д. Здесь селевые потоки формируются при выпадении интенсивных дождей, приводящих к образованию поверхностного стока. Селеобразование в описываемых условиях происходит за счет как плоскостного смыва, так и эрозии в ручейковой сети различного порядка. Как правило, в адырах формируются сели с малой плотностью, но при благоприятных условиях, когда селям предшествуют продолжительные дожди с низкой интенсивностью, могут образовываться мощные сели с плотностью около 2000 кг/м^3. Продолжительные осадки с низкой интенсивностью не приводят к существенным эрозионным процессам в ручейковой сети, но способствуют глубокому проникновению влаги в грунты, уменьшающей сцепление в их поверхностных слоях. Выпадение интенсивных осадков активизирует эрозионные процессы, углубляющие ручейковую сеть, и тем самым создает благоприятные условия для сдвига водонасыщенных грунтов. Сдвиг небольших по объему, но многочисленных массивов грунта приводит к их разжижению и смешению с водой ручейковой сети. Слияние ручьев образует потоки с расходом доли кубометра в секунду, которые на больших уклонах приобретают значительную кинетическую энергию.

Рисунок 1.1. Чуст-Папские адыры Ферганской долины

Несколько иначе происходит рассредоточенное селеобразование на поверхностях скольжения крупных обвалов в коренных породах – очаги Кокчека и Акжар, соответственно бассейны рек Улькен Алматы и Аксай (рисунок 1.2). Падение крупных частых капель дождя на поверхность сколь-

жения приводит к шевелению и качению камней с размерами от 1 до 5 см. Затем камни перемещаются в основном прыжками. Движущихся камней так много, что создается впечатление будто склон покрыт непрерывно изменяющейся во времени и пространстве сеткой. Ручейки образуют потоки, состоящие из воды и рыхлообломочных пород, в составе которых могут находиться камни с поперечными размерами первые десятки сантиметров. Сливаясь, они образуют сели.

Рисунок 1.2. Фрагмент поверхности очага рассредоточенного селеобразования Кокчека (бассейн р. Улькен Алматы)

В зависимости от уклона густой сети оврагов и долин временных потоков (сай, вади, крик), плотности селевой массы и расхода селевого потока происходит частичный распад селевой массы либо обогащение селевого потока твердым компонентом за счет отложений, оставшихся после прохождения селей.

Формирование селей в рытвинах. До последнего времени считалось, что селевые процессы на уступах морен связаны с протаиванием мерзлой моренной толщи, при этом «... непосредственной причиной возникновения грязекаменного потока являются случайные изменения внутриморенных путей разгрузки воды с тающих ледников» [18]. Сложилось устойчивое представление и о том, что в рытвинах, расположенных на уступах морен и в скальных (полускальных) породах, сдвиговые явления не могут вызываться выпадением ливневых жидких осадков из-за относительно невысокой

скорости фильтрации в рыхлообломочных породах, содержащих мелкозем, и относительно небольшой продолжительности ливневых осадков.

Изучение условий формирования селей дождевого генезиса, имевших место в 1980–2000 гг. в бассейнах рек Киши и Улькен Алматы, позволило выявить не известный ранее механизм обводнения рыхлообломочных пород [19]. Полевые наблюдения (осуществлявшиеся практически сразу же после прохождения селей) показали, что в верхних частях рытвин отсутствуют следы дождевых паводков, которые могли бы инициировать эрозионно-сдвиговые явления. Но в то же время в них имелись ступенеобразные углубления, свидетельствовавшие о сдвиговых явлениях. В некоторых случаях, например, в рытвине, находящейся на склоне, примыкающем к пику Амангельды (бассейн р. Киши Алматы) в створе метеостанции «Мынжылки», ступень имела явно выраженную воронкообразную форму.

Результаты исследования позволили выдвинуть гипотезу о закономерности формирования подземных сосредоточенных каналов стока в рытвинах, расположенных на уступах морен и массивах коллювиально-делювиальных отложений (рисунок 1.3). Для проверки этой гипотезы были

Рисунок 1.3. Рытвина №18

пройдены шурфы в рытвинах (представляющих собой верхние части врезов), расположенных на древних моренах пика Советов (бассейн р. Улькен Алматы) и склоне пика Амангельды (бассейн р. Киши Алматы). Во всех случаях на глубинах 1,5–3 м были обнаружены каналы стока в зоне повышенной концентрации крупных фракций рыхлообломочных пород.

Судя по всему, селеформирование в этих рытвинах происходит с периодичностью, определяемой скоростью их заполнения рыхлообломочными породами и выпадением выдающихся жидких осадков на водосборах рытвин. После очередного селеформирования рытвины (на протяжении нескольких лет) заполняются рыхлообломочными породами, осыпающимися и оплывающими с их бортов, приносимыми лавинами, временными водными потоками и микроселями.

На начальной стадии заполнения рытвины рыхлообломочными породами временные водные потоки выносят относительно мелкие частицы, расположенные в промежутках между крупными частицами, образуя канал стока. После того как канал стока приобретает характеристики, обеспечивающие пропуск ординарных паводков, вызываемых жидкими осадками или таянием снега, поступающие рыхлообломочные породы образуют кровлю из несортированных частиц над каналом стока. Накопление материала продолжается до заполнения рытвины либо очередного селеформирования.

Наличие в рытвине подземного канала стока, имеющего ограниченную пропускную способность в условиях безнапорного движения воды, создает благоприятные условия для аккумуляции воды (в ходе напорного обводнения) в массиве рыхлообломочных пород, окружающих подземный канал стока рытвины. Возникновение напора, обусловленного аномально высоким расходом временного водного потока, резко ускоряет процессы фильтрации воды в рыхлообломочные породы, вмещающие сосредоточенный канал стока, в том числе и в верхнюю, относительно канала стока, полуплоскость. Заполнение порового пространства рыхлообломочных пород водой приводит к увеличению сдвигающих сил и уменьшению удерживающих за счет проявления как архимедовой силы, так и фильтрационных сил, обусловленных напорным движением воды в подземном канале стока.

Из сказанного следует, что время, необходимое для подготовки массива рыхлообломочных пород к сдвиговым селевым явлениям, зависит от морфометрических характеристик подземного канала стока в рытвине, интенсивности жидких осадков и характеристик водосбора рытвины, морфометрических характеристик массива, подвергающегося обводнению, гранулометрического и минералогического составов пород, его слагающих.

Из немногочисленных данных об условиях формирования селей дождевого генезиса в Иле Алатау следует, что подготовительный период, предшествующий началу сдвигового процесса в высокогорной зоне, инициирующих мощные сели, составляет от нескольких десятков минут до нескольких часов. Этого времени вполне достаточно для добегания паводковых вод до основного водотока. Слияние паводковых вод с селем, образовавшимся при срабатывании рытвины, создает поток, способный сорвать отмостку русла основного водотока и увеличивать свои характеристики за

счет эрозионных процессов и сдвига (обрушения) пород, вмещающих русло.

Формирование селей во врезах. Врез становится местом формирования дождевых селей, когда на его водосбор выпадают достаточно интенсивные и продолжительные жидкие осадки. Стационарный селевой процесс имеет место, если паводок способен сорвать образованную ранее отмостку русла, создавая благоприятные условия для эрозионного процесса. По мере движения в результате эрозионных и сдвиговых процессов поток обогащается твердым компонентом, вследствие чего расход и объем потока увеличиваются. В ходе стационарных процессов плотность селевой массы в створах наблюдений изменяется незначительно относительно среднего значения.

Наиболее сложным представляется механизм формирования селевой массы в процессе обогащения водного потока твердым компонентом, когда его гранулометрический состав представлен частицами, размеры которых могут отличаться в 10^8–10^{10} раз, т.е. от глинистых частиц до глыб с поперечными размерами 5–10 м и даже более. Такой гранулометрический состав характерен для морен.

Эксперименты по искусственному воспроизведению селей на Шамалганском полигоне показали, что при уклоне селевого очага, близком к 17°, и расходе водного потока от 6 до 24 $м^3/с$ частицы всех крупностей гранулометрического состава морен принимали участие в селеформировании в мере, соответствующей их содержанию в морене (на это указывало отсутствие увеличения концентрации крупных частиц в русле, образовавшемся после формирования селя). Следовательно, средняя скорость движения частиц всех крупностей была практически одинакова.

Селеобразование на склонах и днищах долин. Иной механизм формирования дождевых селей реализуется при аномальном увлажнении рыхлообломочных пород (в том числе снега), залегающих на склонах или днищах долин, уклон которых, как правило, превышает 30° (для снега 5°). В результате потери устойчивости (превышение сдвигающих сил над удерживающими или сейсмическое воздействие) в процессе деформации под действием сил гравитации и инерции аномально увлажненные породы разжижаются, приобретая текучесть. Движение этих масс без нарушения сплошности трактуется как сель (при недостаточном содержании воды сплошность движущейся массы нарушается и такая среда приобретает свойства оползневых или обвальных масс).

1.1.2. Гляциальные сели

Свое определение гляциальные сели получили благодаря тому, что их водный (жидкий) компонент связан с деятельностью ледников. Активизация гляциальных селей характерна для этапа деградации оледенения, когда объем поверхностных и подземных водоемов, возникающих и развивающихся на моренно-ледниковых комплексах, достигает величин, при которых их прорыв приводит к образованию водных паводков, способных формировать катастрофические сели.

Опорожнение водоемов моренно-ледниковых комплексов может происходить как по подземным каналам стока, так и поверхностным путем в результате разрушения озерных перемычек и, как правило, не связано с текущей гидрометеорологической ситуацией. Взаимодействие прорывных паводков с рыхлообломочными породами во врезах приводит к образованию селей.

Аккумуляция воды в водоемах моренно-ледниковых комплексов с последующим прорывом по подземным каналам стока относится к числу достаточно распространенных механизмов формирования прорывных паводков, которые приводили к образованию гляциальных селей в 1951 г. в бассейне р. Киши Алматы [20], в 1958, 1963 гг. в бассейне р. Есик [21], в 1973, 1974, 1979, 1993 гг. в бассейне р. Средний Талгар [22, 23, 24], в 1980 г. в бассейне р. Каскелен [23], в 1982 г. в бассейне р. Сарыкан (Жетысу Алатау) [25].

В результате закупорки подземного канала стока котловина на морене ледника Жарсай (бассейн р. Есик) трижды заполнялась водой: в 1958, 1963 и 1977 гг. Дважды, в 1958 и 1963 гг., опорожнение происходило через грот. Оба опорожнения озера приводили к образованию катастрофических селей. Объем селя 1958 г. составил 4 млн м^3 [26]. Объем селя 1963 г. – 5,8 млн м^3, максимальный расход – 7–12 тыс. м^3/с [27]. Сель 1963 г. уничтожил озеро Есик. В 1977 г. котловина вновь заполнилась водой. Объем образовавшегося озера достиг 480 тыс. м^3. Превентивный сброс воды из озера составил 420 тыс. м^3 [28]. В результате естественного вскрытия подземного канала стока было сброшено еще около 60 тыс. м^3 воды с расходом 35 м^3/с, что привело к формированию селевого потока с максимальным расходом около 700–1000 м^3/с и объемом около 300–400 тыс. м^3 [21, 28]. Своевременно принятые меры по регулируемому опорожнению озера предотвратили формирование селя, идентичного по мощности селю 1963 г.

В 1982 г. в бассейне р. Сарыкан (Жетысу Алатау) сформировался катастрофический сель. Причина возникновения селя – прорыв моренного озера Акколь по подземному каналу стока. Из озера, объем которого составлял 1,5 млн м^3, было сброшено более 400 тыс. м^3 воды в нижние озера, которые также прорвались. На характер прорывного паводка нижние озера в силу их незначительных размеров существенного влияния не оказали, увеличив объем паводка еще на 100 тыс. м^3. Сель прошел через территорию г. Сарыкан с расходом около 300 м^3/с, объемом 821 тыс. м^3 и плотностью селевой массы 2120 кг/м^3 [25].

Примером формирования селей в результате разрушения озерной перемычки может служить сель 1973 г. в бассейне р. Киши Алматы. В 1973 г. разрушение перемычки моренного озера ледника Туйыксу привело к формированию паводка с объемом 225 тыс. м^3 и максимальным расходом около 350 м^3/с. Продолжительность опорожнения озера около 30 мин. Взаимодействие мощного паводка с рыхлообломочными породами способствовало формированию катастрофического селя с расходом около 10 тыс. м^3/с и объемом 3,8 млн м^3 при плотности селевой массы 2390 кг/м^3 [8].

Известны многочисленные факты прорыва внутриледниковых водоемов на ледниках северного склона Киргизского хребта [29]. Достоверно

известно, что в Иле Алатау прорыв внутриледникового водоема на леднике Туйыксу произошел в 1956 г. В результате прорыва отмечалось излияние воды с максимальным расходом около 30 $м^3$/с, количество избыточной по отношению к «норме» воды приближенно оценивается в 1,5–2,0 млн $м^3$ [29].

1.1.3. Водоснежные сели

Водоснежными селями называют потоки, состоящие из смеси воды, снега и рыхлообломочных пород. Такие потоки распространены главным образом в горных районах Арктики и Субарктики, встречаются и в горах средних широт. Существует несколько генетических типов водоснежных селей:

водоснежные потоки «сплошного слоя» (фильтрационные снежные сели) [30]), образующиеся в результате ослабления сил сцепления на контактах снежной толщи с бортами и дном русла за счет промачивания всей толщи снега под действием свободного давления фильтрации воды;

гидронапорные лавины [31] или снежные сели избыточной фильтрации [30], образующиеся в результате срыва снежной толщи под действием разности давлений в ее нижнем и верхнем сечении, обусловленной изменением пропускной способности при увеличении подснежного стока, проседания свода канала или полной его закупорки;

водоснежные потоки, формирующиеся при прорыве завалов, образованных при остановке лавин в руслах рек.

Характер зарождения, движения водоснежных селей и их отложения определяется морфометрическими показателями зон зарождения, транзита и аккумуляции [32, 33]. К качественным отличиям водоснежных селей от граничащих с ними мокрых лавин можно отнести исключительно малый коэффициент трения (до 0,1–0,07) [34], а также их способность перемещаться на значительные расстояния (до 10 км) на относительно малых углах продольного наклона русла (первые единицы и даже доли градуса). Объясняется это резким отличием физико-механических свойств водоснежной массы от насыщенного водой снега. Водонасыщенный снег обладает свойством пластичности, проявляющимся в том, что деформация снежной массы происходит лишь при превышении сдвигающего напряжения величины предельного напряжения сдвига. Сопротивление движению водоснежных селей определяется преимущественно турбулентной вязкостью. В селевой массе практически не проявляются силы, имеющие кулоновскую природу, поскольку плотность снега меньше плотности воды. Кулоновское трение проявляется лишь в ситуациях, когда снежные блоки, касаясь дна, выступают над вмещающим их водным компонентом. Последняя ситуация типична для зоны аккумуляции твердого компонента при распластывании потока в пойме реки на малых ее уклонах.

Гидронапорные сели возникают в результате сдвига водонасыщенных снежных масс вследствие разности давлений в сдвигающей толще.

В подавляющем числе случаев водоснежные сели в отрицательных формах рельефа, в которых накапливаются значительные толщи навеянного снега (их мощность может превышать 10 м), образуются в условиях запоздалой, но дружной весны. В более редких случаях селеобразованию предшествовало выпадение дождей. Объясняется это тем, что при постепенном повышении температуры воздуха увеличение пропускной способности каналов внутриснежного стока происходит быстрее, чем возрастает талый сток, что обеспечивает возможность беспрепятственного пропуска талых и дождевых вод.

Качественно иная ситуация имеет место в условиях запоздалой дружной весны или выпадения интенсивных и достаточно продолжительных жидких осадков. Каналы стока не обеспечивают безнапорный пропуск воды. Напорный режим приводит к заполнению порового пространства снежного массива водой. Увеличение температуры снега за счет тепла воды способствует уменьшению прочности снежных масс. Основной причиной зарождения водоснежных селей является давление подснежной воды, а не тангециальная составляющая силы тяжести. При превышении сдвигающих сил над удерживающими происходят сдвиг водонасыщенных снежных масс (рисунок 1.4) и трансформация их в водоснежный сель.

Рисунок 1.4. Место отрыва водонасыщенной снежной массы, приведшей к формированию водоснежного селя. Стрелкой указан «подземный канал стока» (фото В. П. Благовещенского)

В процессе движения селевой массы снежные блоки уплотняются с частичным вытеснением из них воды. Это позволяет вовлекать в движение снежные массы и воду, накопившиеся в нижерасположенной части русла и

не имевшие ранее возможности самостоятельного движения. Если соотношение объема воды и снега (с учетом его уплотнения в процессе движения) благоприятствует селеобразованию, расход и объем водоснежного потока возрастают. Если соотношение снега и воды в вовлекаемых в селеобразование массах не благоприятно для образования текучей среды, водоснежный сель постепенно трансформируется в мокрую лавину, движение которой возможно только на относительно больших уклонах.

Формирование водоснежного селя в результате отрыва пласта снежного покрова на склоне имеет место при насыщении пласта водой (в результате выпадения дождя или таяния снега) до состояния, при котором происходит его отрыв в результате действия силы тяжести или (и) давления воды в зоне контакта пласта с подстилающей поверхностью.

Остановка лавин в руслах горных рек может приводить к образованию снежных завалов, создающих благоприятные условия для аккумуляции значительных объемов воды. Прорыв таких водоемов с большим расходом воды и дальнейшее ее движение по руслу и пойме реки сопровождается вовлечением в русловой процесс льда, снега, рыхлообломочных пород и других материалов. Насыщение потока рыхлообломочными породами до состояния, при котором его наличие станет оказывать значимое влияние на движение потока, может рассматриваться как селевой процесс. Вовлечение рыхлообломочных пород в описываемый процесс может приводить к многократному, по сравнению со значениями водного паводка, увеличению расхода и объема головной части селевого потока.

В процессе движения снежные блоки взаимодействуют с рыхлообломочными породами, вмещающими русло водотоков. При этом блоки «инкрустируются» песком, гравием и даже крупной галькой; и хотя это практически не сказывается на плотности четырехкомпонентной смеси (воздух, вода, снег, рыхлообломочные породы), береговые валы, образованные массой, покрытой частицами горных пород, даже через относительно длительные промежутки времени могут восприниматься неподготовленными наблюдателями как отложения грязекаменных селей. После таяния снега от таких валов остается лишь тонкий (в несколько сантиметров) слой песка с включением более крупных частиц.

Деградация водоснежных селей обусловлена в большинстве случаев их распластыванием в поймах и руслах рек. В ходе деградации происходят отложение твердого компонента селевой массы, а также временная остановка воды, удерживаемой этими фракциями.

После прохождения водоснежных селей русла рек практически полностью освобождаются от снега и льда. Свежие отложения водоснежных потоков представляют собой спрессованный мокрый снег комковатой структуры с включениями песка, щебня и более крупных обломков, содержание последних редко превышает 5–10 % [35].

Сведения о большой разрушительной силе водоснежных потоков позволяют предполагать, что снежная масса в составе смеси имеет склонность к объединению в блоки с размерами, сравнимыми с глубиной потока.

В России водоснежные сели главным образом распространены на территориях, прилегающих к Северному Ледовитому океану, на Полярном и Приполярном Урале, в Магаданской области [32, 36–38], на Алтае [33]. В Казахстане водоснежные сели наблюдались также в Иле и Жетысу Алатау [34].

Разработка методов прогнозирования и борьбы с водоснежными селями затруднена в силу их слабой изученности и отсутствия оперативной информации о состоянии водоснежных масс на склонах водосборов и в руслах водотоков.

1.1.4. Водоледяные сели

Водоледяные потоки – «… один из видов селевых потоков, в селевой массе которых твердая составляющая представлена обломками льда с участием снега и обломков горных пород» [35]. Водоледяные сели бывают ледникового и речного генезиса. Ледниковые сели образуются в результате срыва ледяных масс, насыщенных трещинными водами (ледник Колка, Северный Кавказ 1902, 2002 гг.; ледник Уаскаран, Перу 1962, 1970 гг.).

Водоледяные сели речного генезиса «… образуются в период зимних оттепелей вследствие срыва ледяных порогов из донного льда или прорывов снежных завалов, созданных лавинами. Твердая составляющая потока формируется, помимо тел ледяных порогов и снежных завалов, за счет снежно-ледяного покрова, наледей, шуги, русловых отложений» [35].

Водоледяные образования, приводящие к формированию водоледяных селей на горных реках Иле Алатау, возникают при температуре воздуха ниже –10 ºС в ходе образования льда как в поверхностном слое водного потока, так и по всей его глубине. Условия, благоприятствующие этим процессам, создаются при резком понижении температуры воздуха, когда ледяной покров на реках еще практически не начал формироваться: теплообмен воды с воздушными массами происходит на относительно больших площадях при малой глубине водного потока и интенсивном его перемешивании.

Особенности формирования водоледяных образований на горных реках Казахстана обусловлены морфологией русел, их большими (1–5º и более) уклонами, относительно небольшими (доли, единицы кубометров в секунду) расходами воды в зимний период времени.

Отмостка русел горных рек образуется потоками, транспортирующими большое количество наносов в конечных фазах селевых процессов. В конечной фазе селевых процессов в результате уменьшения расхода селевых потоков часть крупных камней и глыб задерживается в руслах, создавая условия для остановки относительно более мелких фракций. Это приводит к тому, что русло в продольном направлении приобретает ступенеобразный характер. В осенний, а в некоторых случаях и летний периоды года крупные фракции отмостки выступают над поверхностью водных потоков.

Особенности руслообразования горных рек описываемого региона приводят к тому, что глубина потока по всей его ширине может изменяться в

больших пределах, становясь практически нулевой как у берегов, так и у камней, выступающих из воды. Следствием этого является различный характер течения воды.

Переохлаждение воды приводит к образованию поверхностного льда на участках русла с малыми глубинами в виде заберегов и венков вокруг камней, выступающих над поверхностью воды. Если теплообмен между водой и воздухом невелик, ледяной покров формируется в результате роста и смыкания заберегов и венков, перемещения и смерзания поверхностного льда и шуги. Экранирование потока ледяным покровом затрудняет теплообмен между водой и воздухом, тем самым уменьшая образование внутриводного льда, частичная остановка которого приводит к уменьшению площади живого сечения потока и, как следствие, выходу воды на поверхность ледовых образований. Уровень воды в реке при описанном сценарии образования ледяного покрова незначительно отличается от такового, существовавшего до образования ледяного покрова.

Если ледяной покров образуется в результате резкого перепада температуры воздуха от положительных значений к отрицательным, ледообразование происходит во всей массе воды. На участках рек с небольшими скоростями течения процессы ледообразования и формирования ледяного покрова протекают в поверхностном слое воды. На участках активного перемешивания воды внутриводный лед образуется по всей глубине потока. Переохлаждение водных масс сопровождается образованием шуги, движением ее вниз по течению. Ледяной покров в местах малой водопропускной способности формируется путем образования перемычек между забегами и венками, образующимися вокруг камней, выступающих над поверхностью потока. В результате остановки, сплочения и замерзания шуги на участках с малой водопропускной способностью она еще больше уменьшается. Это приводит к увеличению уровня воды с образованием заводей, на поверхности которых из-за малых скоростей течения образуется лед. В результате увеличения гидравлического сопротивления и глубины потока скорость течения уменьшается. Это приводит к дальнейшему росту уровня воды. Из-за повышения глубины потока скорость течения и, как следствие, интенсивность перемешивания уменьшаются. Тем самым условия образования шуги ухудшаются. В большинстве ситуаций вода выходит на поверхность льда. Путь, проходимый водой по поверхности льда до замерзания ее фронтальной части, зависит от толщины слоя воды и ее температуры, а также теплообмена между водой, льдом и атмосферой. Движение упомянутого слоя воды сопровождается намерзанием льда на ледяной поверхности, по которой течет вода, а также образованием тонкого ледяного покрова на поверхности воды.

Остановка движения слоя воды в результате замерзания его фронтальной зоны способствует дальнейшему увеличению уровня воды в реке и выходу ее на вновь образованный ледяной покров и т.д. При этом создается «слоеный пирог», состоящий из тонких прослоев воды и льда.

Из рисунка 1.5 следует, что в ходе формирования водоледяных образований формируются десятки прослоек. При наличии в русле крупных

Рисунок 1.5. Результат многослойного формирования
фронтальной части водоледяных образований (р. Проходная)

Рисунок 1.6. Формирование водоледяных образований
(р. Узынкаргалы)

Рисунок 1.7. Образование водоледяных ступеней
(р. Узынкаргалы)

камней в течение 3–4 сут образуются ступени высотой до 2,5–3 м (рисунки 1.6, 1.7). В результате русло и в значительной мере пойма реки заполняются водоледяными образованиями, объем которых (на единицу длины русла) может более чем на порядок превышать объем воды при прохождении выдающихся дождевых паводков в теплый период года.

В ситуациях, когда интенсивность образования шуги велика (в том числе за счет снежуры), а относительно высокая скорость течения воды на поверхности заводи препятствует образованию льда на ее поверхности, водоледяные ступени образуются в основном в результате остановки, сплочения и замерзания шуги (рисунок 1.8).

Подпитка воды теплом из нижнего полупространства, а также экранирование нижележащих прослоек прослойками, расположенными выше, приводит к тому, что постепенно согревающийся «слоеный пирог» может сохраняться несколько суток, что делает все водоледяное образование крайне неустойчивым к воздействию внешних и внутренних сил.

Наличие воды в прослоях подтверждается ее истечением (в ходе локального разрушения водоледяных образований) с образованием «сталактитов» и «сталагмитов» при температуре воздуха минус 10–15 ºС, исключающей возможность образования воды путем таяния льда или снега (рисунок 1.9).

Рисунок 1.8. Водоледяные образования, при формировании которых большую роль играла шуга (р. Аксай, Иле Алатау)

Рисунок 1.9. Образование «сталактитов» и «сталагмитов» в ходе постепенной отдачи воды из слоеной ледовой толщи после частичного разрушения водоледяных образований (р. Киши Алматы)

Формирование водоледяных образований приводит к существенному изменению водного режима реки. Как правило, водоледяные сели на северном склоне Иле Алатау образуются в конце ноября – начале января, то есть в меженный период. Поскольку формирование водоледяных образований до состояния, при котором их разрушение может принимать катастрофический характер, занимает 4–7 дней, а атмосферный температурный фон исключает таяние льда и снега и, как следствие, поступление талых вод в реки, можно считать, что питание рек происходит только за счет грунтовых вод, дебит которых в этот период практически не изменяется. Следовательно, в ходе формирования водоледяных образований и вызванного ими увеличения уровня воды в реке расход воды в реке (на более низких высотных отметках) будет уменьшаться. Снижение расхода воды приведет к тому, что водоледяные образования будут формироваться в условиях уменьшения пропускной способности каналов, создающихся в водоледяных образованиях, при одновременном сокращении теплообмена воды с холодными воздушными массами.

Сокращение теплообмена воды с холодными воздушными массами приведет к снижению интенсивности роста водоледяных образований и накопления воды в русле и в конечном счете стабилизации расхода. Тем самым создаются предпосылки для разрушения водоледяных образований вследствие возрастания расхода воды, которая затрачивалась ранее на ледообразование.

Схематическая иллюстрация процессов, связанных с формированием и разрушением водоледяных образований, приведена на рисунке 1.10.

Момент времени t_1 соответствует началу резкого понижения температуры воздуха. До этого момента времени температура воздуха, высота водоледяных образований и расход воды какое-то время практически не изменялись. В период времени t_1–t_2, соответствующий уменьшению температуры воздуха до минимального значения, происходит постепенное снижение температуры воды до 0–0,2 °С, поэтому сначала уровень воды увеличивается медленно, а расход воды (за счет ледообразования) медленно уменьшается. Затем рост водоледяных образований ускоряется, а расход воды снижается. По мере повышения температуры воздуха (интервал времени t_2–t_3) высота водоледяных образований растет, а расход воды уменьшается за счет образования льда и накопления воды в русловой и пойменной емкостях.

В ходе дальнейшего увеличения температуры воздуха, например в момент времени t_4, может произойти разрушение одного из водоледяных образований. При этом расход потока в створе резко возрастет (см. рисунок 1.10, *C,* кривая *1*), а после этого возвратится (см. рисунок 1.10, *C*, кривая 2) на значение, близкое по величине в момент t_1, а уровень понизится (см. рисунок 1.10, *B*, кривая *1*).

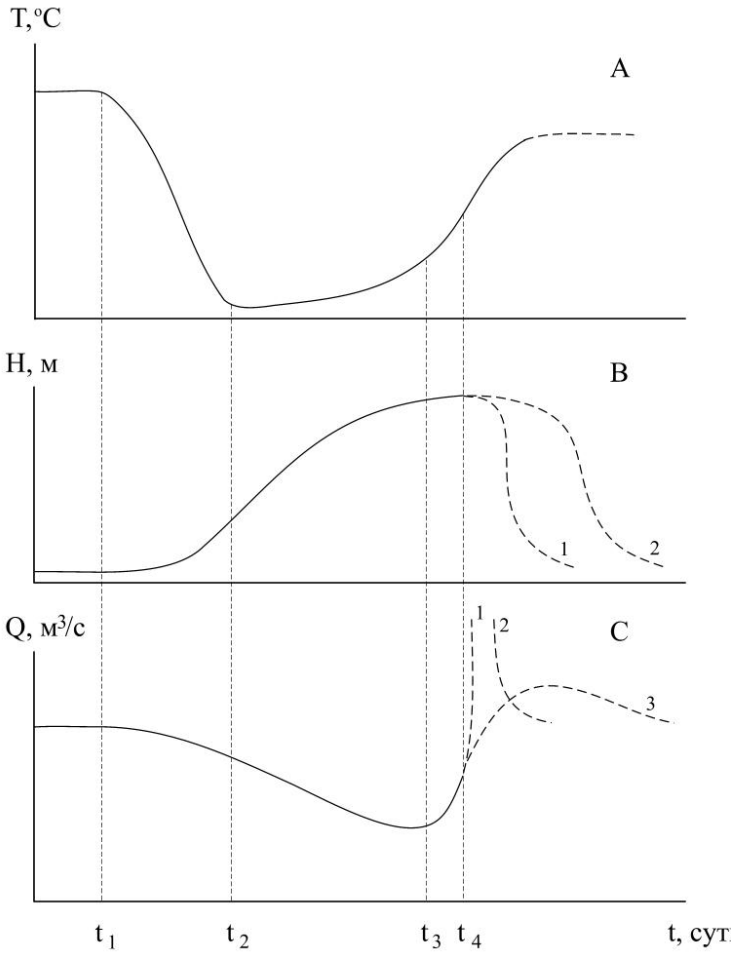


Рисунок 1.10. Схематическая иллюстрация процессов, связанных с формированием и разрушением водоледяных образований: *A* – изменение температуры воздуха; *B* – изменение уровня воды; *C* – изменение расхода воды

Если катастрофического разрушения водоледяных образований не произойдет, расход воды и после t_4 будет постепенно повышаться и даже на некоторое время превысит значение, соответствующее t_1 (см. рисунок 1.10, *C*, кривая *3*), за счет излияния воды из русловой и пойменной емкостей, а затем вновь возвратится к значению на момент t_1. Как отмечалось, разрушение водоледяного образования может произойти и без увеличения температуры воздуха.

Более сложная картина будет наблюдаться в нижерасположенных створах: там разрушение водоледяных образований будет обусловливаться воздействием волны, образующейся при разрушении вышерасположенных водоледяных образований.

1.1.5. Оползни, трансформирующиеся в сели

При прогнозе формирования селей, в ходе сдвига и разжижения увлажненных массивов рыхлообломочных пород, критический уклон определяется из условия равенства удерживающих и сдвигающих сил. При этом используются методы расчета устойчивости склонов.

По Ю. Б. Виноградову [18], оползни, трансформирующиеся в сели, могут возникать на морфологических образованиях трех типов:

уступах морен с гляциальным обводнением;

ложбинах в скальных и полускальных породах в основном с ливневым обводнением;

ложбинах с задернованными и залесенными склонами с ливневым обводнением.

В ложбинах с задернованными и залесенными склонами сели образуются очень редко – один раз в несколько десятилетий, что, вероятно, связано с особенностями формирования подземных каналов стока и дождевого паводка [18].

Примером оползней, образующихся на крутых уступах древних морен, может служить оползень 1958 г. [27] (согласно другой гипотезе – 1963 г. [21]) на древней морене ледника Жарсай (бассейн р. Есик). В результате прорыва ледникового озера часть паводка обводнила (по подземным каналам стока) мощную толщу рыхлообломочных пород. Ее сдвиг и разжижение привели к формированию селя с объемом около 2 млн $м^3$ [39].

По мнению Ю. Б. Виноградова, селевые потоки, формирующиеся в ложбинах в скальных и полускальных породах, не относятся к числу выдающихся, их объемы исчисляются десятками, реже сотнями тысяч кубометров. Исключением являются крупные ложбины, приуроченные к разломам и зонам дробления пород, в таких случаях объемы селей могут достигать нескольких миллионов кубометров.

Большой теоретический и практический интерес представляют подготовка рыхлообломочных пород к сдвигу и собственно процесс трансформации оползней в селевые потоки, происходящие на южном склоне Главного Кавказского хребта в бассейне р. Дуруджи. «Селеобразующий очаг представляет собой участок дна горной долины, на котором накапливается твердый минеральный материал, поступающий с поверхностей оголенных склонов» [40]. Относительное превышение склонов над очагами – 500–1200 м, крутизна склонов – 30–60° и более. Основными поставщиками рыхлообломочных пород являются небольшие, но многочисленные оползни и осыпи. Часть мелких фракций поступает в составе временных водных потоков, лавин и т.д. Минералогический состав пород – глинистые сланцы, незначительную долю составляют песчаники. Гранулометрический состав: глины – 3–4 %, пыль – 16–18 %, песок – 10–15 %, остальная часть приходится на фракции более 1 мм.

Процесс накопления материала начинается после очередного селевого явления, в результате которого практически весь рыхлообломочный массив, накопившийся ранее, выносится за пределы долины. В первой стадии

накопления, когда мощность отложений невелика, рыхлообломочные породы характеризуются большими значениями пористости и угла внутреннего трения. По мере возрастания мощности отложений, вследствие чего вероятность выноса мелких фракций уменьшается, поры заполняются упомянутыми фракциями. Трансформация гранулометрического состава рыхлообломочных отложений, обусловленная процессами физико-химического выветривания, взаимодействие воды с пылевато-глинистыми фракциями, сопровождающееся увеличением объемов смеси, заполняющих поровое пространство, образуемое относительно крупными частицами, приводят к расклиниванию этих частиц, уменьшению числа жестких контактов между ними. Благодаря этому, а также взвешивающему воздействию (архимедова сила) образующейся вязкопластичной среды, заполняющей поровое пространство, на относительно крупные частицы угол внутреннего трения образующейся смеси уменьшается. Тем самым создаются предпосылки для локальных деформаций массивов. В свою очередь, результатом деформации является разуплотнение массивов (увеличение пористости) и, как следствие, увеличение кулоновского трения, что приводит к прекращению деформации.

Со временем образовавшиеся при деформациях поры заполняются тонкодисперсными фракциями. Вновь происходят деформации и т.д. Трансформация массива селеформирующих пород вступает в заключительную фазу, когда мощность отложений достигает критических значений (плотность массива – 2400 кг/м^3 при удельном весе пород 2650–2700 кг/м^3) [41]. При этом образовавшаяся масса переходит в состояние предельного равновесия: объем массы (за счет увеличения пористости) растет, а плотность уменьшается и достигает 1800–2000 кг/м^3. Критическая глубина массы в селевом очаге р. Шави Дуруджи равна 8–9 м.

Выпадение ливневых осадков в количестве 60–70 мм с интенсивностью 0,7–1 мм/мин приводит к возникновению катастрофических селей с расходом до 1250 кг/м^3 и плотностью селевой массы до 2320 кг/м^3.

Факторами, способствующими формированию селей, могут быть сейсмические воздействия, заполнение порового пространства водой дождевых паводков, увеличение сдвигающих напряжений за счет перегрузки дополнительными порциями водно-грунтовых смесей, не приводящей к пропорциональному возрастанию сил сопротивления сдвигу, имеющих кулоновскую природу.

1.1.5.1. Оползни, образующиеся в результате антропогенного обводнения

При локальном обводнении лёссовых массивов (как правило, это происходит вследствие неисправности водопроводных сетей или неконтролируемого орошения садово-огородных культур) образуются оползни с круглоцилиндрической поверхностью скольжения.

Обводнение больших площадей лёссовых массивов осуществляется при многолетней эксплуатации оросительных систем, в конструкции кото-

рых не были предусмотрены антифильтрационные экраны. Примером такой селевой деятельности могут служить оползни и сели, сформировавшиеся во время Гиссарского землетрясения 23 января 1989 г. [42]. Район Гиссарского землетрясения является одним из наиболее освоенных в Гиссарской долине. За 20-летний период эксплуатации оросительной системы потери воды на инфильтрацию превысили 50 млн м^3. В толще лёссового массива образовалась зона переувлажнения мощностью 24–28 м.

В результате землетрясения сформировались 4 крупных оползня. Наибольший из них имел объем 60–65 млн м^3, его размеры: длина – 3700 м, ширина – 600 м, мощность – до 28 м. Разжижение оползневой массы привело к формированию потока, продвинувшегося на несколько километров. Сель нанес большой ущерб, погибли люди.

Другим примером является катастрофический сель, сформировавшийся 13 марта 1961 г. на территории г. Киева [43]. Верхняя часть оврага Бабий Яр заполнялась отходами добычи глины методом гидротранспорта. За 1954–1961 гг. было намыто грунта объемом около 3,2 млн м^3. Намытый грунт высыхал только в поверхностном слое мощностью около 1 м. Основная толща грунта находилась во влажном состоянии. Небольшой паводок в результате выпадения дождя вызвал размыв дамбы. Как только промоина достигла толщи грунта, находившегося во влажном состоянии, скорость углубления резко возросла. По оврагу двинулся грязевой вал высотой 8 м, его ширина достигала 70 м. Истечение грунта продолжалось около получаса. Объем массы, пришедшей в движение, оценивался в 600 тыс. м^3. Глубина потока на территории города, примыкающей к оврагу, была около 4 м, площадь затопления достигла 0,25 км^2. Сель нанес большой ущерб, погибли 143 человека. По данным [44], описанная катастрофа унесла жизни 1500 человек.

1.1.5.2. Мутьевые потоки

Гравитационное придонное течение смеси воды и мелких фракций горных пород в морях и океанах, возникающее при нарушении равновесия сдвигающих и удерживающих сил в водонасыщенных донных отложениях на склонах морского дна в результате землетрясений или иных причин, называется мутьевым потоком. По данным о времени разрыва трансатлантических кабелей скорость движения мутьевых потоков может достигать 90 км/ч. Мутьевые потоки, образующиеся при оползании фронтальных частей дельт крупных рек, способны перемещать осадконакопления дельт на расстояния, превышающие 100 км.

1.1.6. Сели сейсмического генезиса

Сейсмические явления могут способствовать как возникновению факторов, необходимых для селеформирования, так и созданию условий, при которых существующие селеформирующие факторы могут иметь значительно меньшие (минимально необходимые или критические) характеристики.

Катастрофические землетрясения играют важную роль в рельефообразовании, благоприятствующему формированию селей. Это обвалы, перегораживающие ущелья, оползни, смещения по разрывам и т.д. Со временем большинство из них в результате денудации постепенно сглаживаются или исчезают совсем. Эффективным агентом переноса наносов являются сели.

Как правило, завальные массы образуют плотины, преграждающие течение горных рек, при этом возникают озера, прорыв которых может вызвать гигантские паводки и сели. Интервалы времени между образованием озер и их катастрофическим прорывом могут быть различными. Например, завал на р. Есик и образованное им озеро просуществовали тысячи лет. В таких ситуациях завалы образуют временные хранилища наносов, прерывающие на длительные интервалы времени вынос наносов из высокогорной зоны на предгорную равнину.

Сейсмические колебания способны привести к потере устойчивости водонасыщенных грунтов. В результате этого грунты могут приобрести выраженные вязкопластические свойства, обусловливающие возможность течения разжиженных масс даже на относительно малых уклонах.

Сейсмическое воздействие на моренно-ледниковые комплексы приводит к возникновению обвалов снежно-ледовых и моренных масс, создавая тем самым предпосылки для формирования селей. В большинстве перемычки наиболее крупных озер моренно-ледниковых комплексов – достаточно прочные образования, представленные, как правило, моренным грунтом, сцементированным льдом. Однако термокарстовые процессы способны значительно ослабить озерные перемычки, и тогда небольших сейсмических воздействий может оказаться достаточно для того, чтобы произошли проседание перемычки, перелив озерных вод через перемычку и ее разрушение (в принципе это возможно и без сейсмических воздействий). Землетрясения могут вызвать и закупорку подземных каналов стока в моренно-ледниковых комплексах. При закупорке каналов стока образуются озера с объемом до нескольких сотен тысяч кубометров. Прорыв озер приводит к формированию селей.

Напряжения в коренных породах, возникающие в результате сейсмического воздействия, способствуют образованию обвалов и толщ раздробленных пород, прилегающих к плоскости скольжения. Углы наклона этих плоскостей составляют десятки градусов. Большие углы наклона, наличие в составе раздробленных пород пылевато-песчаных частиц приводят к тому, что при выпадении ливней формируются сели. Обычно расход и объем таких селей незначительны, но так как повторяемость их относительно велика, сели могут блокировать движение транспорта и представлять угрозу жизни и здоровью человека. Примером тому служат селевые очаги Акжар (бассейн р. Аксай) и Кокчека (бассейн р. Улькен Алматы), образовавшиеся в результате Верненского землетрясения в 1887 г.

Известны случаи, когда землетрясения провоцировали выдающиеся по масштабам селевые явления. Наиболее известен сель в Перуанской Западной Кордильере, вызванный обрушением ледовых масс в результате землетрясения 1970 г. [29]. 31 мая 1970 г. в результате мощных сейсмических

толчков от ледника Хелмес вершины Уаскаран откололся и обрушился огромный блок льда и горных пород. По оценке Л. Ллибутри, в селевом процессе приняли участие 7 млн м^3 скальной породы, 1 млн м^3 льда с вершины, 4–5 млн м^3 фирна с нижнего ледника, 30 млн м^3 моренных и флювиогляциальных отложений. В створе г. Юнгай (2570 м) объем селевой массы составлял 23 млн м^3 [29]. Средняя скорость продвижения фронта потока на 14-километровом участке от подошвы Уаскарана (5700 м) до г. Юнгай оценена приблизительно в 110 м/с [45, 46]. Мощные селевые явления имели место на Аляске во время землетрясения 27 марта 1964 г. [29].

Во время Верненского землетрясения 28 мая 1887 г. одновременно образовалось множество оползней и обвалов, некоторые из которых трансформировались в селевые потоки. Наиболее крупные и почти сплошные следы разрушений наблюдались на высоте 1500–1800 м на протяжении 35 км вдоль хребта. Общий объем перемещенных пород на северном склоне Иле Алатау оценен И. В. Мушкетовым [47] в 440 млн м^3.

1.1.7. Сели антропогенного генезиса

Далеко не последнюю, а иногда даже решающую роль в формировании селевых потоков, прежде всего в среднегорной и низкогорной зонах, играет антропогенный фактор. Сели, возникающие в результате вмешательства человека в природные процессы, называются антропогенными.

Сели, вызванные неправильной эксплуатацией различного рода накопителей, отличаются катастрофичностью проявления и масштабностью последствий, включающих, помимо всего, возможность загрязнения природной среды. Сели такого типа могут возникать в местностях, где перепады высот очень малы. Примером может служить сель 28–29 января 1988 г., образовавшийся в результате прорыва аварийного накопителя сточных вод при температуре воздуха ниже –20 ºС, расположенного в песках Жаманкум вблизи г. Алматы [48, 49]. Объем селя составил 72,5 млн м^3, т.е. почти в 20 раз превышал объем селя 1973 г. в бассейне р. Киши Алматы, максимальный расход достигал 1,5–2,5 тыс. м^3/с, плотность селевой массы составляла 1900±20 кг/м^3. Сель нанес большой ущерб, погибли люди.

Неправильные проектирование и эксплуатация оросительных систем, бесконтрольный полив становятся причиной водонасыщения больших массивов грунтов. В последнем десятилетии XX века наблюдались десятки случаев формирования оползней в низкогорной зоне северного склона Иле Алатау, трансформировавшихся в сели. Площади оползней обычно не превышали нескольких сотен квадратных метров, объемы – нескольких тысяч кубометров.

Вырубка леса приводит к изменению структуры поверхностного слоя грунта, уменьшению перехвата осадков растительностью. В районах многолетней мерзлоты вырубка леса способствует более глубокому оттаиванию грунтов. Это способствует активизации селевых и оползневых процессов. Примером селевой деятельности, связанной с вырубкой леса, может служить сель, прошедший 8 июня 1969 г. в Карпатах (хр. Горган, бассейн

руч. Конусяк). В результате выпадения дождя (в течение суток) слоем 200 мм произошли сдвиг переувлажненных грунтовых масс, их разжижение и трансформация в селевой поток. Границы образовавшегося очага совпали с границами сплошной вырубки хвойного леса, которая была проведена в 50-е годы XX века [50].

Водохранилища в горах представляют потенциальную опасность для объектов, находящихся в нижележащей части долины. Нарушение устойчивости склонов и их оползание в водохранилище могут привести к разрушению плотины и формированию катастрофического паводка. Подобная катастрофа произошла в Италии на р. Пьяве в 1963 г. [44]. Паводок был вызван оползнем, сошедшим в водохранилище Вайонт. Сход оползня в водохранилище привел к вытеснению воды и переливу ее через плотину. Образовавшимся потоком было уничтожено несколько населенных пунктов. Погибло более 2000 человек.

Глава 2

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ СЕЛЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕЛЕВЫХ БАССЕЙНАХ

Селевым бассейном называют часть речного бассейна, включающего толщу почвогрунтов, потенциально способную принимать участие в селеобразовании, поверхностный и подземный водосборы, селеопасные озера, подземные моренно-ледниковые водоемы, очаги селеобразования, селевые русла, конусы и поля выноса [3]. В селевом бассейне различают три основные зоны: селеобразования (стартовая зона, селевые очаги), промежуточную (транзитная зона) и разгрузки (зона отложения, конусы выноса). Продольные профили, построенные от истоков рек до подошв конусов выноса основных рек северного склона Иле Алатау, приведены на рисунке 2.1.

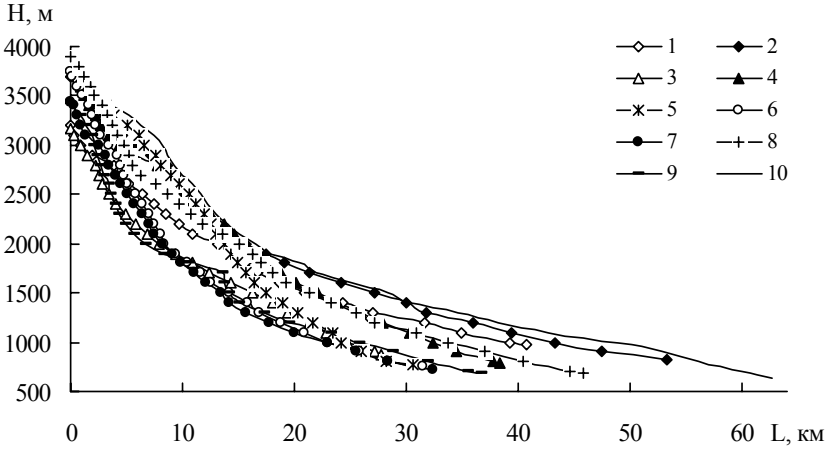


Рисунок 2.1. Продольные профили основных рек северного склона Иле Алатау от истоков до подошв конусов выноса.
1 – Каракастек, *2* – Узынкаргалы, *3* – Шамалган, *4* – Каскелен, *5* – Аксай, *6* – Улькен Алматы, *7* – Киши Алматы, *8* – Талгар, *9* – Есик, *10* – Турген

На суше существуют три яруса накопления наносов [51]. Два из них, высокогорье и предгорная равнина, являются составными частями селевого бассейна. Верхний ярус накопления наносов включает в себя морены, продукты отложения обвалов и оползней, осыпи, конусы выноса рытвин и т.д. В пределах этого яруса расположены основные очаги зарождения катастрофических селей, поэтому его классифицируют как стартовую зону [52], зону формирования [7], питания и селеформирования [53]. Средним

ярусом накопления наносов являются конусы выноса, расположенные на предгорной равнине. Вершины конусов выноса примыкают к долинам горных рек на выходе их из гор. Этот ярус классифицируют как зону разгрузки селя (массового отложения селевых выносов) [53], зону затухания или разгрузки селя [7].

Часть селевого бассейна – горную долину, расположенную между описанными ярусами накопления наносов, называют транзитной зоной или зоной движения селя [7, 53]. Лишь в очень редких случаях описываемая зона в полной мере выполняет транзитные функции. Как правило, в зависимости от масштаба селевых процессов здесь происходит либо отложение малых селей, либо мощные сели обогащаются отложениями малых селей, а также рыхлообломочным материалом, поступающим в прирусловую область с примыкающих склонов в виде оползней, осыпей и т.д. в межселевой период. Вода (грунтовая, поровая, боковых притоков) играет важную роль во время прохождения селя, поскольку она может принимать участие в селевом процессе: способствует частичному распаду селевой массы, вызывая разжижение селевого потока либо увеличение его расхода и объема путем набора рыхлообломочного материала.

2.1. Зона селеобразования

Основные закономерности воздействия природных и антропогенных факторов на развитие селевых процессов в зоне селеобразования рассмотрим на примере северного хребта Тянь-Шаня – Иле Алатау. Осевая линия хребта Иле Алатау расположена практически в широтном направлении. Центральная часть хребта на его северном склоне имеет высоту, превышающую в условиях современного климата на 200–1200 м положение снеговой линии. Этому способствует и то обстоятельство, что основная масса влаги в этом регионе переносится северо-западными воздушными потоками. Существующие в климате высокогорья ледники и снежники оказывают большое влияние на зоны многолетней мерзлоты, фазовый состав осадков и характеристики дождевого стока, режим ледникового питания, возникновение и развитие каменных глетчеров, характеристики таяния и стока талых вод, расход воды в реках ледникового питания.

По последним данным, площадь оледенения Иле Алатау составляет 262 км^2 [54]. Ледники являются основным механизмом формирования и переноса рыхлообломочного материала в верхнем ярусе накопления наносов северного склона Иле Алатау [55]. Ледники не только транспортируют обломки горных пород, попадающих на их поверхность и в трещины с окружающих склонов, но и являются мощным инструментом выравнивания их ложа. Скорость экзарации зависит от многих факторов: скорости течения и мощности ледника, температуры льда, а также геологического строения ложа ледника и особенностей новейшей тектоники.

Характеристики оледенения хребта в решающей мере определяются климатом. Наиболее мощные морены, сохранившиеся до настоящего времени, образовались в среднем и верхнем плейстоцене. Эти морены распо-

ложены на высотах 1500–3000 м. Их верхняя часть перекрывается современными моренами. Нижняя граница сохранившихся частей древних морен, как правило, соответствует границе перехода троговых долин в V-образные. Часто к главным троговым долинам примыкают висячие долины или осыпи, обрамляющие подножия скальных гребней. Типичным примером описываемого может служить высокогорная часть бассейна р. Киши Алматы (рисунок 2.2). Рыхлообломочный материал со склонов перемещается к осевой части троговой долины преимущественно в ходе маломасштабных селевых процессов. При этом образуются шлейфы небольших по объему пролювиальных конусов выноса. Периферийные части этих конусов выноса достигают русла р. Киши Алматы и размываются ее водами.

Рисунок 2.2. Верховье троговой долины р. Киши Алматы

В бассейне р. Киши Алматы наибольший вынос наносов может иметь место при селеформировании на древней морене ледника Маншук Маметовой, примыкающей к главной троговой долине с востока. Благодаря действию факторов выветривания на протяжении более 10 тыс. лет гранулометрический и минералогический составы рыхлообломочных пород этой морены существенно отличаются от состава современной морены: в нем больше мелкозема, в том числе пылевато-глинистых частиц. Каналы поверхностного стока воды, образующейся при таянии снега и льда, а также выпадении атмосферных осадков отсутствуют. Наличие вреза в морене и конуса выноса, примыкающего к врезу и расположенного перпендикулярно троговой долине, а также следы формирования селя в области, примы-

кающей к западной части современной морены ледника Маншук Маметовой, свидетельствуют об активной селевой деятельности гляциального генезиса в относительно недалеком прошлом, а рельеф поверхности – о солифлюкционных процессах в настоящее время и мощном каменном глетчере в голоцене. Морена имеет геологическое строение, протяженность и уклон, благоприятные для формирования мощных селей, обладающих ярко выраженными вязкопластическими свойствами.

Отложения небольших селей, а также рыхлообломочный материал, слагающий конусы выноса, примыкающие к троговой долине, выносятся мощными селями на предгорную равнину. Активизация каменных глетчеров, вызванная потеплением климата, привела к тому, что они, опускаясь в долины рек, могут вытеснять озера и создавать естественные плотины, способные временно задерживать в долинах, имеющих относительно небольшие уклоны, оползни и сели, формирующиеся в высокогорной зоне (рисунок 2.3).

Рисунок 2.3. Каменный глетчер, образовавшийся на восточном склоне пика Орджоникидзе, перегородил долину р. Левый Талгар

Потепление климата, особенно в XX–XXI веках, стало причиной деградации горного оледенения, сопровождавшегося отступанием ледников и формированием на концах языков подземных и поверхностных водоемов. Прорыв этих водоемов практически во всех селевых бассейнах северного склона Иле Алатау приводил к формированию селей, в том числе катастрофических.

Твердый компонент селевых потоков, формирующихся на современных моренах, отлагается, как правило, в верхней части троговой долины. Практически полное отсутствие глинистых фракций в составе современных морен, а также относительно малое содержание мелкозема в полном гранулометрическом составе селеформирующих пород исключают возможность проявления свойства пластичности у селевой массы, образующейся в результате взаимодействия водного потока с рыхлообломочным материалом. Поэтому, несмотря на большой расход селей, образующихся на современных моренах при прорыве моренных озер и внутриледниковых водоемов, при их выходе в троговую долину происходит частичный распад селевой массы, сопровождающийся отложением ее твердого компонента (рисунки 2.4, 2.5). Селевой процесс затухает и вновь активизируется лишь в той части троговой долины, где морена верхнечетвертичного возраста на относительно большом протяжении имеет значительный уклон.

Рисунок 2.4. Отложения селевой массы в верхней части троговой долины р. Кумбель (сель 1977 г.). В левой (ниже центра) части фотографии – отложения суспензии, излившейся из порового пространства крупных фракций селевой массы (средняя часть фотоснимка)

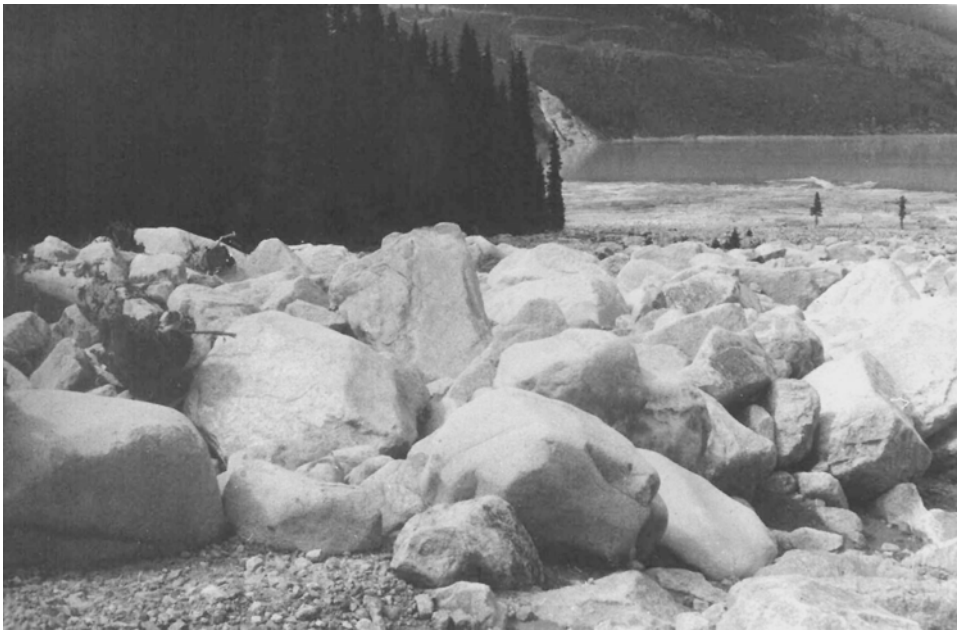


Рисунок 2.5. Отложения крупных фракций селя 1994 г. на р. Озерная.
При малом содержании пылевато-глинистых фракций из порового пространства валунов и глыб вытекают не только суспензия, но и частицы размером до 200 мм.
Такие отложения часто принимают за отложения водокаменных селей

Малое содержание пылевато-глинистых частиц в гранулометрическом составе современных морен объясняется низкой скоростью химического выветривания в условиях холодного климата высокогорья и относительной «молодостью» дезинтеграции (разделения на составные части под действием различных факторов и сил) горных пород. Благодаря этому сель, сформировавшийся на современной морене ледника Туйыксу в 1973 г., практически полностью распался в троговой долине р. Киши Алматы, не достигнув плотины в урочище Мынжылки.

Климат высокогорья Иле Алатау в XX веке, благоприятный для формирования и прорыва селеопасных водоемов, являлся недостаточно теплым для массового образования селей дождевого генезиса. Зона селеобразования (очаги зарождения) катастрофических селей дождевого генезиса XX века в описываемом районе находилась преимущественно на высоте 2700–3600 м. Как показывают наблюдения, ливневые осадки слоем 60 мм и более в этом высотном интервале выпадают в жидком виде очень редко. Вероятность выпадения селеформирующих осадков в высокогорной зоне резко возрастет при повышении температуры воздуха на 2–3 °С за счет увеличения стокообразующих площадей водосборов (где осадки будут выпадать в жидком виде) и вовлечения в селевой процесс рыхлообломочных пород, залегающих на склонах на высоте 3600–4000 м, где их уклон близок к углу естественного откоса (рисунок 2.6).

Рисунок 2.6. Система рытвин в верховьях р. Кумбель,
в которых зарождались мощные сели дождевого генезиса

На рисунке 2.7 приведены продольные профили селеформирующих зон основных селевых бассейнов Иле Алатау. Их начала привязаны к единой высотной отметке (3400 м). Это не совсем правильно, так как истоки рек находятся на различных, хотя и незначительно отличающихся высотах. Но, с другой стороны, появляется возможность визуальной сравнительной оценки уклонов верхнего яруса накопления наносов и зон формирования селей. Из рисунка 2.7 видно, что наибольший уклон селеформирующей зоны (2200–3400 м) принадлежит бассейнам рек Есик, Киши и Улькен Алматы, наименьший – Турген, Аксай. Разница в уклонах существенна: уклоны селеформирующих зон отличаются практически в два раза.

Известно, что интенсивность вовлечения рыхлообломочного материала в процесс селеформирования (эрозионно-сдвиговый селевой процесс) пропорциональна уклону селеформирующей зоны [4], поэтому сели в бассейне р. Есик очень быстро достигают плотности, которая позволяет им беспрепятственно перемещаться в промежуточной зоне. Если энергия рельефа в зонах селеформирования (имеющих меньшие уклоны) других бассейнов близка по величине, то отличие в уклоне может в определенной мере компенсироваться за счет увеличения длины зоны селеформирования.

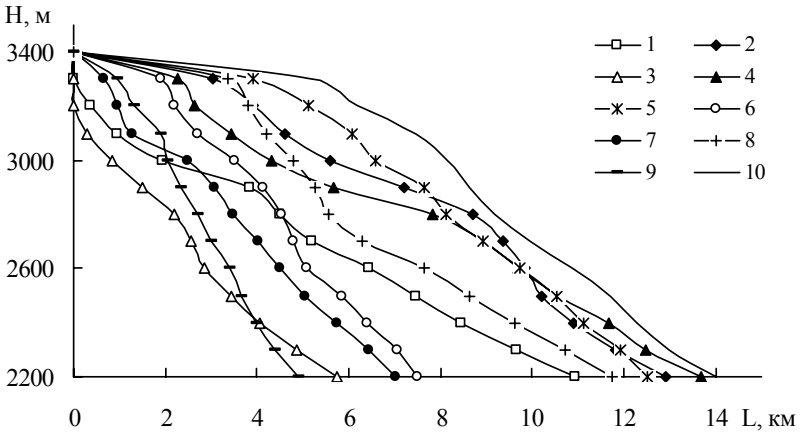


Рисунок 2.7. Продольные профили основных селеформирующих зон северного склона Иле Алатау.
1 – Каракастек, *2* – Узынкаргалы, *3* – Шамалган, *4* – Каскелен, *5* – Аксай, *6* – Улькен Алматы, *7* – Киши Алматы, *8* – Талгар, *9* – Есик, *10* – Турген

Рисунок 2.8. Селевые очаги на древней морене в верховьях р. Жарсай. Левый очаг – результат образования селей, формировавшихся при взаимодействии сосредоточенных водных потоков с рыхлообломочными породами. Правый – оползневая воронка, появившаяся в результате оползня, трансформировавшегося в сель

На крутых протяженных фронтальных частях древних морен в условиях, благоприятствующих их обводнению, мощные сели могут формироваться в результате трансформации крупных оползней. Пример такого явления – сель, образовавшийся в 1958 г. в бассейне р. Есик (рисунок 2.8). Причиной аномального увлажнения послужил прорыв водоема, неоднократно возникавшего в результате закупорки подземного канала стока.

Высокая сейсмическая активность, большие уклоны в зоне зарождения селей, мощное оледенение и большой слой выпадающих жидких осадков обусловили аномально высокую селевую активность бассейна р. Есик. Поэтому объем конуса выноса р. Есик практически равен объему конуса выноса р. Талгар, бассейн которого имеет значительно большую площадь водосбора и оледенения.

2.2. Промежуточная зона

Промежуточная (транзитная [7, 53]) зона селевого бассейна северного склона Иле Алатау представляет собой горную долину основной реки (в редких случаях – долины крупных притоков основной реки) и расположена преимущественно на высоте 1100–2200 м. В этой зоне глубина расчленения рельефа может превышать 1000 м, а углы наклона склонов 15–70°. Наибольший уклон имеют скальные массивы.

Склоны преимущественно восточной и западной ориентации. Такое расположение склонов, значительный слой жидких осадков в центральной части хребта Иле Алатау благоприятствуют произрастанию древесной и травянистой растительности, способной перехватывать значительную долю осадков, препятствовать эрозии и сдвигу почвенного слоя. Поверхностный сток на склонах промежуточной зоны – исключительно редкое явление.

На востоке и западе хребта из-за недостаточного увлажнения растительный покров не способен противостоять эрозии и сдвиговым явлениям, поэтому выпадение интенсивных и продолжительных жидких осадков приводит к формированию незначительных по расходу и объему селей на склонах горных долин. Однако выпадение селеформирующих осадков на больших площадях может способствовать формированию мощных селей в результате слияния многочисленных микроселей.

Уклон основных долин северного склона Иле Алатау составляет 2–8°, но в некоторых случаях превышает 10°. Как правило, при подходе селя к промежуточной зоне селевая масса имеет реологические характеристики, позволяющие (при больших значениях расхода и объема селя) перемещаться селевой массе до конуса выноса, расположенного в предгорной зоне, без остановки и частичного распада.

При наличии в промежуточной зоне рыхлообломочного материала движение селя сопровождается дополнительным набором рыхлообломочной породы и воды, поступающей из притоков реки. Кроме этого, при углублении русла в селевой поток поступает грунтовая и поровая вода, содержащаяся в рыхлообломочной породе. При этом расход и объем селя могут значительно возрастать (рисунки 2.9–2.11). В качестве примера может

Рисунок 2.9. Углубление русла р. Сарыкан в промежуточной зоне,
образованное селем 1982 г.

Рисунок 2.10. Русло, образованное мощным селем в отложениях селевого конуса выноса.
Конус выноса образован небольшими селями, двигавшимися
перпендикулярно основной долине

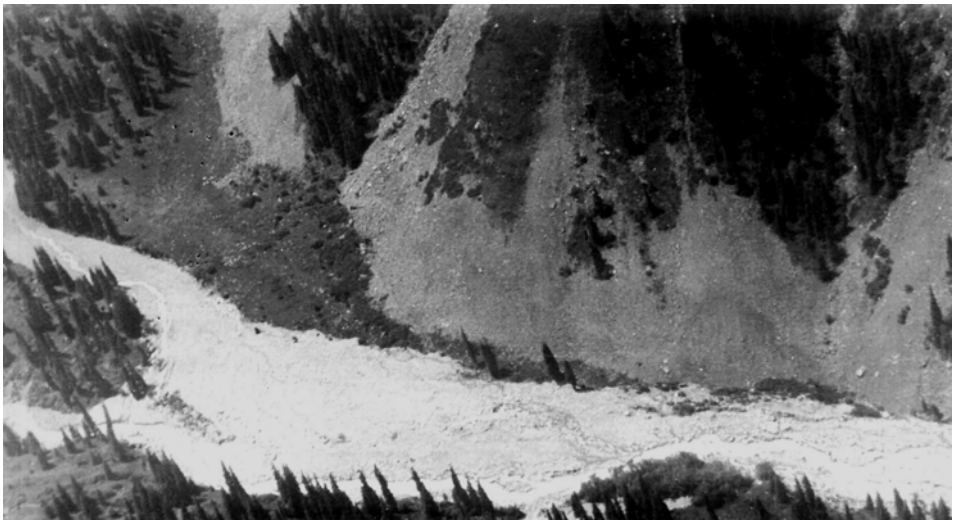


Рисунок 2.11. Отложения селя в промежуточной зоне р. Есик.
В заключительной части селевого процесса произошло отложение селевой массы (левая часть фотографии). Наличие подрезанных склонов (правая часть фотографии) свидетельствует о том, что в активной фазе селевого процесса происходило углубление прирусловой области долины

служить сель 1921 г. на р. Киши Алматы. Русло реки от Медеу до южной окраины г. Верного было углублено на 10–12 м. Объем выноса русловых отложений составил 1–2 млн м^3 [56].

Сель 1973 г. на р. Киши Алматы углубил русло реки на 12–15 м (местами до 40 м) [8]. В результате увеличился объем и расход селя не менее чем в 2–3 раза. Заслуживает внимания тот факт, что русло реки, формирующееся в моренных отложениях Иле Алатау, может углубиться на такую величину с расходом водного потока 3–5 м^3/с не менее чем за 100 тыс. лет. Объясняется это тем, что река течет в русле с отмосткой, сформированной постселевыми паводками, имевшими расход, скорее всего, больший расхода водных паводков, образующихся при выпадении интенсивных осадков или прорыве относительно небольших водоемов моренно-ледниковых комплексов, но обладавших большой плотностью (1400–1600 кг/м^3). Конечно, даже очень крупные камни со временем истирались, а их обломки уносились паводками. Это приводило к некоторому углублению русла. Однако углубление русла способствовало обрушению его бортов, содержавших не менее крупные обломки, что временно могло приводить даже к увеличению высотных отметок дна русла по сравнению с предшествующим состоянием.

Углубление русла в промежуточной зоне происходит в основном в период усиления селевой активности, когда преобладают сели, имеющие большие объем и расход. Возрастание высотных отметок дна русла характерно для периода низкой селевой активности. В это время расход и объем селей настолько малы, что отложение селевой массы происходит в пределах гор.

Если расход селя небольшой (в широкой долине даже при относительно большом расходе), селевая масса перемещается в условиях проявления кулоновского трения из-за того, что размеры крупных фракций превышают глубину потока. Это приводит к частичному отложению валунно-глыбовых фракций в промежуточной зоне, распластыванию селя еще до выхода на конус выноса (рисунок 2.12). Толчком к остановке селя в промежуточной зоне могут служить также естественные и искусственные препятствия. Так, во время селя 1956 г. на р. Киши Алматы в районе дома отдыха Совета Министров произошло массовое отложение крупных фракций, вызванное недостаточной пропускной способностью подмостового отверстия.

Рисунок 2.12. Распластывание селя 1982 г. в широкой долине р. Сарыкан. Присутствие обмазки на вертикальных поверхностях глыб, а также наличие поверхностных трещин на селевой массе свидетельствуют о ее высокой плотности

Отложение селя в промежуточной зоне может происходить и при объеме селя, составляющем миллионы кубометров. Причиной тому может служить большая плотность, следовательно, и большое значение предельного напряжения сдвига селевой массы. Основная масса селя 1977 г. отложилась на участке долины р. Улькен Алматы от устья р. Кумбель до устья р. Проходная [57]. На этом участке долины (длиной около 8 км) отложилось до 2,5 млн $м^3$ селевой массы, мощность отложений превышала 3 м. На этом же участке произошло отложение селя 1975 г., а также всех селей, сформировавшихся в бассейне р. Кумбель после селя 1977 г.

Однако было бы ошибочным полагать, что отложение небольших селей в промежуточной зоне доминирует над их выносом мощными селями. Такой процесс привел бы к увеличению мощности отложений и изменению формы продольных профилей промежуточных зон. Уклон продольного профиля в

такой ситуации был бы существенно различным на начальном и конечном участках промежуточной зоны. За счет более частых отложений малых селей уклон продольных профилей должен был бы увеличиваться от конусов выноса, находящихся на выходе из гор, к верхнему ярусу накопления наносов. Форма продольных профилей промежуточных зон свидетельствует о незначительном изменении их уклона (рисунок 2.13), а близость коренных пород (на отдельных участках даже их выход на дневную поверхность) – об отсутствии систематических накоплений в промежуточных зонах.

На рисунке 2.13 показаны продольные профили промежуточной зоны основных рек северного склона Иле Алатау от высотной отметки 2200 м (среднее значение начала промежуточных зон) до вершин конусов выноса, расположенных на предгорной равнине. Наименьший уклон имеют промежуточные зоны бассейнов рек Узынкаргалы и Турген, их среднее значение – около 2,5°. Максимальный уклон наблюдается в бассейне р. Аксай – около 6°. Нетипичная форма продольного профиля обсуждаемой зоны р. Есик – следствие образования завальной плотины и заполнения естественного селехранилища наносами. Относительное увеличение уклона промежуточных зон в верхней их трети часто объясняется выходом коренных пород.

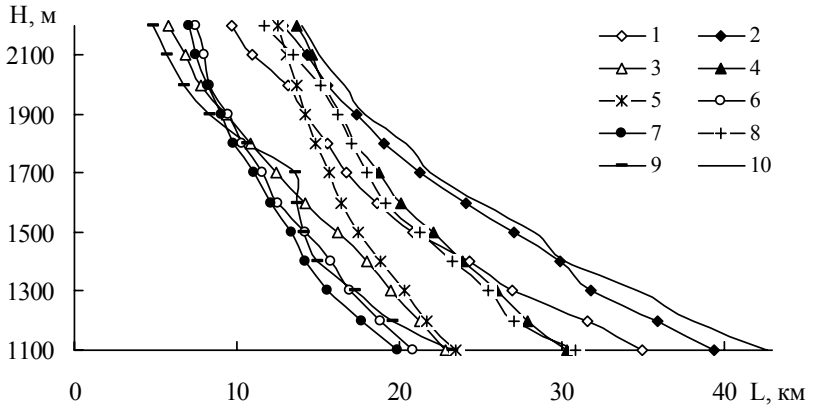


Рисунок 2.13. Продольные профили промежуточной зоны.
1 – Каракастек, *2* – Узынкаргалы, *3* – Шамалган, *4* – Каскелен, *5* – Аксай, *6* – Улькен Алматы, *7* – Киши Алматы, *8* – Талгар, *9* – Есик, *10* – Турген

Промежуточные зоны бассейнов рек, расположенных западнее р. Улькен Алматы (Аксай, Каскелен, Шамалган, Узынкаргалы и Каракастек), а также небольших водотоков восточнее р. Турген вплоть до р. Ассы находятся в долинах, образованных селями и реками в верхней предгорной ступени, возникшей в среднем плейстоцене. Верхняя предгорная ступень – следствие поднятия части предгорной равнины, на которой конусы выноса формировались в периоды активизации селей в миндель-рисском, гюнц-миндельском и более древних межледниковых эпохах. Таким образом, сели, зарождающиеся в высокогорной зоне упомянутых рек, на заключительной стадии развития вовлекают в селеобразование отложения древних

селей, отлагая их на конусах выноса, замыкающих горные долины в настоящее время. Запасы рыхлообломочных пород, представленных отложениями древних селей, составляют несколько десятков кубокилометров и могут при расчетах считаться неисчерпаемыми.

Мощность отложений наносов в промежуточных зонах незначительна и не превышает, как правило, первых десятков метров. С учетом того, что разность высот между началом и концом промежуточной зоны составляет более 1000 м, можно утверждать: отложения наносов практически не влияют на форму продольных профилей промежуточных зон селевых бассейнов северного склона Иле Алатау. Длина промежуточной зоны определяется особенностями рельефа селевых бассейнов и для этого района изменяется от 10 до 31 км.

2.3. Зона разгрузки

Как правило, зона разгрузки мощных селей приурочена к конусам выноса. Конус выноса – форма рельефа, образованная скоплением рыхлого обломочного материала, отложенного постоянными или временными потоками у нижнего конца оврага или долины, где происходит резкое уменьшение живой силы потока, и имеющая вид плоского полуконуса, обращенного вершиной против течения потока. Особенно большие конусы выноса образуются при выходе горных рек на прилегающую равнину [58].

Конус выноса – элемент селевого бассейна и является продуктом его деятельности. Морфометрические характеристики конусов выноса зависят от повторяемости и масштаба селевых явлений, которые определяются орографией бассейна, характеристиками поверхностей стокообразования, осадками, площадью оледенения, минералогическим и гранулометрическим составами селеформирующих грунтов [59, 60]. Конусы выноса представляют собой самую высокую и наиболее крутопадающую часть предгорной равнины – территорию, наиболее благоприятную для жизни и хозяйственной деятельности человека.

Основным механизмом переноса наносов из верхнего яруса накопления на средний ярус в горных районах средних широт, несущих в настоящее время оледенение, являются сели, формирующиеся при прорыве водоемов моренно-ледниковых комплексов, а также выпадении ливневых дождей в высотной зоне 3000–4000 м и более в межледниковые эпохи. Значительно более редки сели, вызываемые прорывом завальных озер [61]. Их расход может составлять десятки тысяч кубометров в секунду, а объем – десятки миллионов кубометров.

Напротив, активизация накопления лёсса на конусах выноса происходит в ледниковые эпохи. Об этом свидетельствуют результаты изучения ледяных кернов, полученных в Антарктиде при бурении ледника на куполе «С». Установлено, что содержание пыли в ледовой толще крайне неоднородно и обусловлено глобальными изменениями скорости ветра в ходе перестройки климата (рисунок 2.14) [62]. Устойчивость процесса накопления лёсса на конусах выноса обеспечивалась практически полным прекращением

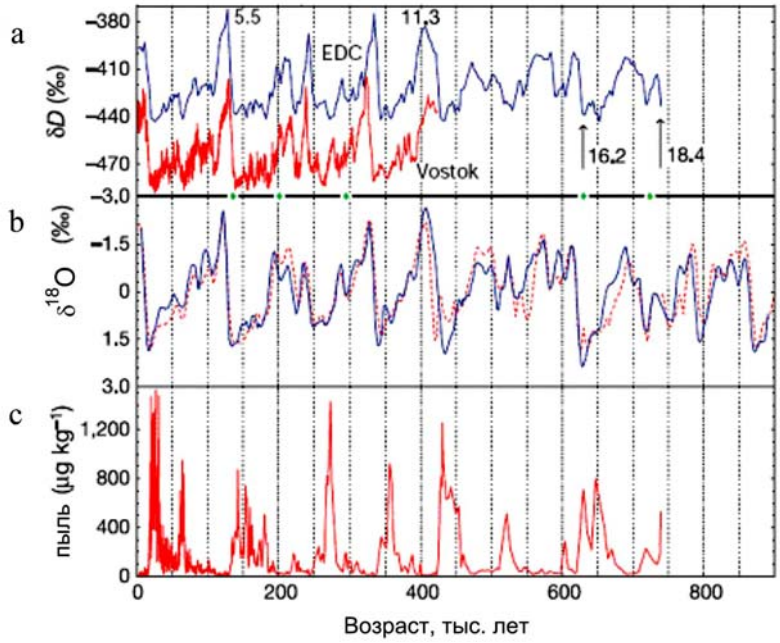


Рисунок 2.14. Динамика различных показателей климата Антарктиды за 800 тыс. лет (по абсциссе – тысячи лет до настоящего момента):
a – относительное содержание дейтерия δD во льду (синяя линия – купол «С», красная – станция «Восток»), чем больше дейтерия, тем теплее был климат;
b – содержание тяжелого изотопа кислорода $\delta^{18}O$ в донных осадках (разным цветом показаны данные, относящиеся к разным районам океана); при потеплении климата содержание $\delta^{18}O$ в океанической воде снижается (обратите внимание, что используется инвертированная шкала; соответственно повышение температуры также отмечается пиками);
c – содержание пыли во льду на куполе «С», пыль откладывается в основном в период оледенений [62]

отложений селей на конусах выноса и резким уменьшением твердого стока (прежде всего частиц с размерами, которые реки не были способны выносить за пределы конусов выноса). Мощность лёссового покрова к концу ледниковой эпохи может достигать нескольких десятков метров. Однако, как показало изучение строения конуса выноса р. Аксай, доля лёсса в общем объеме конуса выноса незначительна [63]. Во время глобальных потеплений, вызывающих активизацию селей, лёссовый покров разрушается и выносится за пределы конусов выноса. Оставшиеся фрагменты лёссового покрова могут войти в состав конуса выноса лишь в том случае, если они перекрываются селевыми отложениями и в дальнейшем не подвергаются размыву водными потоками или не вовлекаются в состав движущейся селевой массы.

Выдающаяся роль селей в процессах денудации стала осознаваться только в последние десятилетия. «… Сели следует рассматривать как важнейший природный механизм перемещения рыхлых отложений в горных странах с верхних на нижние уровни накопления …» [51] (рисунок 2.15).

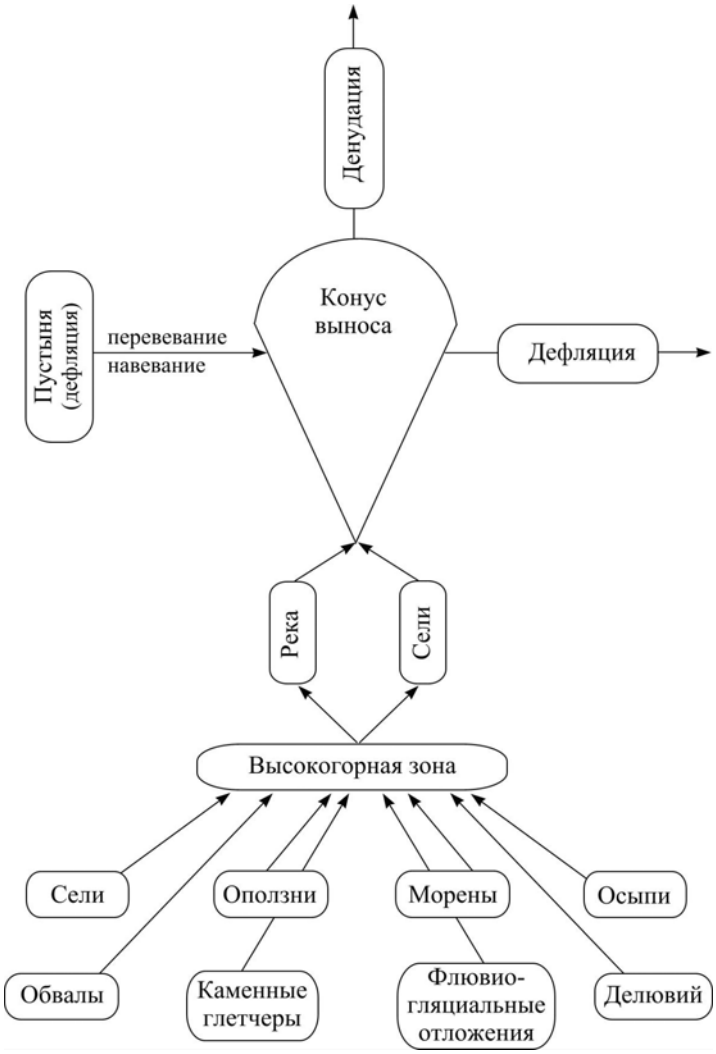


Рисунок 2.15. Схема накопления и переноса наносов с верхнего яруса накопления (высокогорной зоны) на средний ярус (предгорную равнину)

Не случайно селевые отложения на конусах выноса на большинстве инженерно-геологических карт интерпретировались и интерпретируются до настоящего времени как флювиогляциальные. По мнению авторов этих карт, такие отложения могли возникнуть только в периоды деградации покровного и полупокровного оледенений, когда в результате таяния ледников, размеры которых существенно превосходили современные, на основных реках северного склона Иле Алатау формировались паводки, способные перемещать на относительно малых уклонах глыбы весом десятки тонн.

Ошибочные представления о генезисе подавляющей части отложений на конусах выноса северного склона Иле Алатау приводили к неверной трактовке механизма формирования конусов выноса. «… У подножия хребта реки откладывают громадную массу обломочного материала в виде

сплошного шлейфа конусов выноса …» [64]. Эти представления согласуются в основном с представлениями М. И. Ломоновича, считавшего, что «… процесс формирования конусов выноса изменялся во времени, порою же он совсем прерывался размывом. Вследствие этого строение конусов выноса оказалось достаточно сложным. В каждом из них имеется более древний конус, сформировавшийся в период второго этапа аккумуляции, и более молодой, вложенный в первый, возникший в период третьего этапа аккумуляции. … Современные отложения конусов выноса, в свою очередь, вложены в новочетвертичные и по сравнению с более древними выдвинуты вперед …» [65].

Изучение строения конусов выноса северного склона Иле Алатау показало, что относительно молодые конусы выноса не «вкладываются» в более древние, а перекрывают их, увеличивая размеры конусов выноса как по площади основания, так и в высоту. «Вложение» типично лишь для вершинных частей конусов выноса в периоды активизации селей. В период затухания селевой активности объемы селей значительно уменьшаются. Это приводит к отложению селей преимущественно в вершинной части конусов выноса, увеличивая продольный уклон их вершинных частей. Именно эта часть конуса выноса и углубляется в первой фазе активизации селей. В дальнейшем вся поверхность конуса выноса перекрывается наносами мощностью десятки метров (рисунок 2.16).

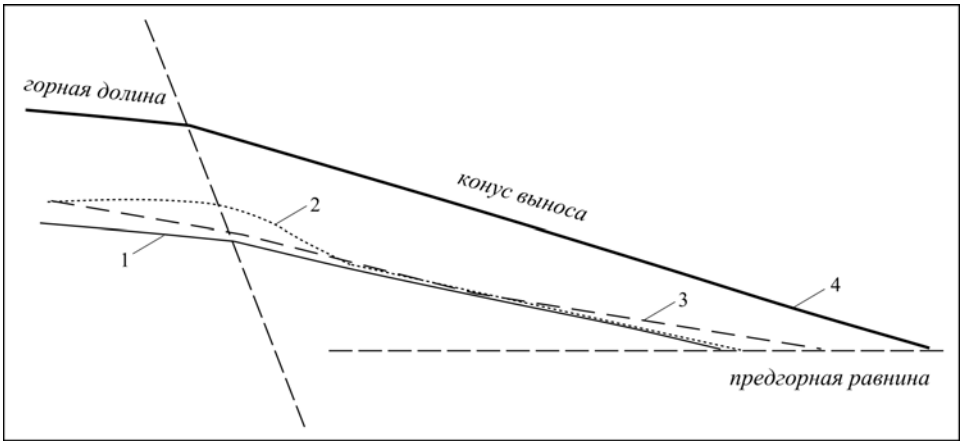


Рисунок 2.16. Стадии и фазы формирования селевого конуса выноса.
Продольные профили отложений: *1* – в активной стадии *i*-го межледниковья;
2 – в конечной фазе активной стадии *i*-го межледниковья;
3 – в начальной фазе активной стадии (*i*+1)-го межледниковья;
4 – в активной стадии (*i*+1)-го межледниковья

Результаты изучения строения конусов выноса, а также механизмов их формирования показали, что форма поверхности конусов выноса, сложенных аллювием, принципиально отличается от формы конусов выноса, образованных преимущественно селевыми отложениями (рисунки 2.17, 2.18) [66–68]. На топографических картах периферийные горизонтали селевых конусов выноса, в отличие от аллювиальных, если их аппроксимировать

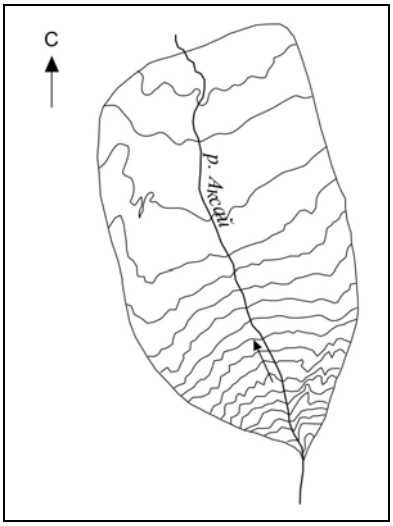


Рисунок 2.17. Конус выноса р. Аксай, сложенный в основном селевыми отложениями

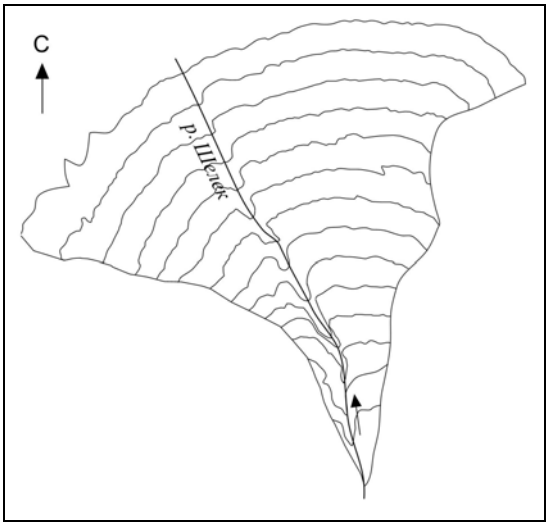


Рисунок 2.18. Конус выноса р. Шелек, сложенный аллювиальными отложениями

окружностями, имеют радиусы большие, чем расстояние от вершины конуса выноса до соответствующей горизонтали в осевом направлении. В определенных ситуациях кривизна периферийных горизонталей принимает обратное направление [66]. Другим существенным отличием в форме горизонталей конусов выноса являются практически равные расстояния между горизонталями как на вершине конуса выноса, так и на его периферии у конусов выноса аллювиального генезиса и существенно различные у конусов выноса, образованных в основном селевыми отложениями. Указанные отличия позволяют с высокой степенью достоверности выявлять на топографической карте территории, подверженные разрушительному воздействию селей.

Конусы выноса Северного Тянь-Шаня и Жетысу Алатау выполнены преимущественно селевыми отложениями. Они имеют характерную конусообразную форму, их вершины приурочены к местам выхода селей в более широкую долину или на предгорную равнину. Эоловые и аллювиальные отложения играют второстепенную роль (рисунки 2.19, 2.20).

На топографической карте масштаба 1:100 000 конус выноса можно опознать по веерообразному рисунку горизонталей и его слабо расчлененному рельефу с небольшими уклонами в продольном и поперечном направлениях, сети водотоков. Боковые границы конуса выноса – это хорошо выраженные понижения в рельефе, которые являются границами веерообразного рисунка горизонталей. Боковыми границами, как правило, являются постоянные водотоки. Когда бассейны располагаются близко друг к другу и их конусы выноса перекрываются, границу раздела конусов выноса порой выделить достаточно сложно. Эта граница может быть получена путем экстраполяции линии раздела в той части соприкасающихся конусов

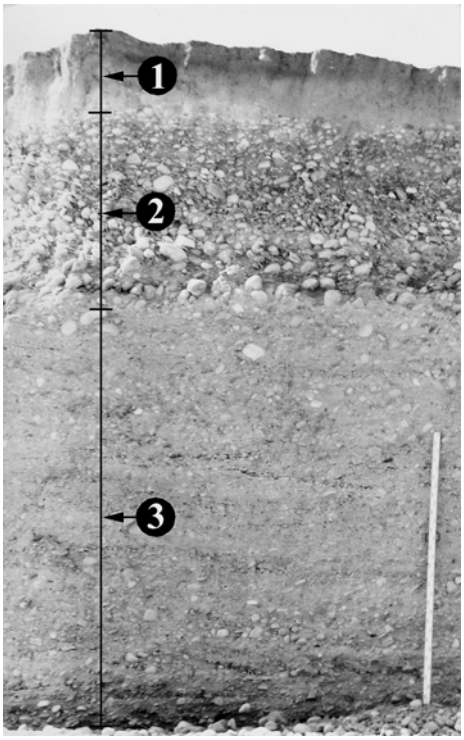


Рисунок 2.19. Эоловые (*1*), аллювиальные (*2*) и селевые (*3*) отложения, вскрытые в результате эрозионной деятельности селей на конусе выноса р. Сарыкан (длина рейки 3 м)

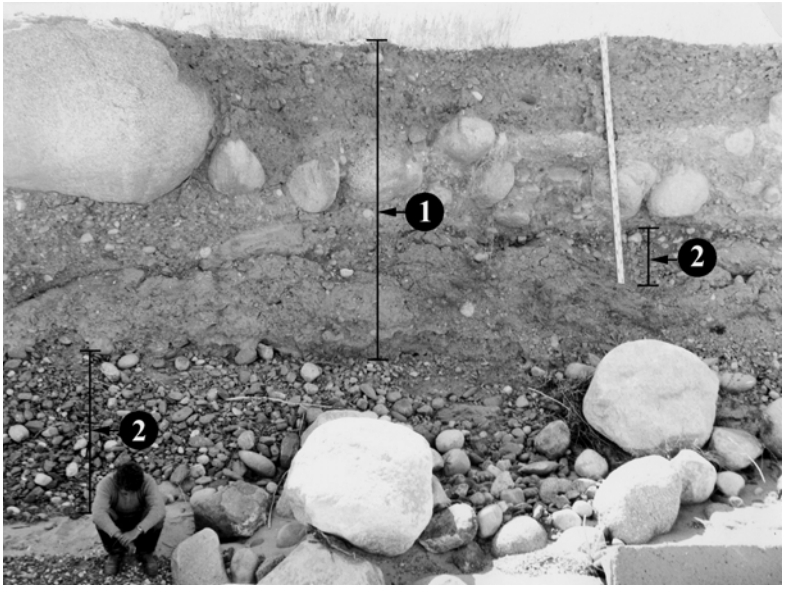


Рисунок 2.20. Разрез отложений конуса выноса р. Сарыкан (в приповерхностном слое). Перемежение селевых (*1*) и аллювиальных (*2*) отложений

выноса, где дешифрирование не вызывает сомнений. Подошву конуса выноса можно определить по следующим признакам:

значительно уменьшается уклон, который принимает значение уклона предгорной равнины, примыкающей к конусу выноса;

наличие выклинивания грунтовых вод, заболоченных участков (*сазов*), солончаков [69].

Конусы выноса, расположенные в предгорной зоне северного склона Иле Алатау, представлены преимущественно селевыми отложениями, гранулометрический состав которых существенно отличается от такового аллювиальных отложений. Максимальное различие в гранулометрическом составе имеет место в количественном содержании наиболее мелких и крупных частиц. Аллювиальные отложения практически не содержат пылевато-глинистых частиц, а также валунов и глыб, размеры которых превышают 0,5 м.

Конусы выноса в той или иной степени перекрыты лёссом. В западной части хребта Иле Алатау мощность лёсса максимальна. Наличие промоин в лёссовом покрове конусов выноса затрудняет их выделение на карте. Примером может служить конус выноса р. Узынкаргалы (рисунок 2.21). Правая (орографически) часть его перекрыта лёссом, мощность отложений 20–25 м. Мощность лёссового покрова $H_л$ на конусе выноса можно оценить по размаху извилин горизонталей:

$$H_л = \frac{lh}{L}, \qquad (2.1)$$

где l – размах извилин горизонтали, м; h – высота сечения горизонталей на карте, м; L – расстояние между смежными горизонталями, м.

Встречаются ситуации, когда конус выноса одного генезиса находится на поверхности конуса выноса другого генезиса. На рисунке 2.22 приведена

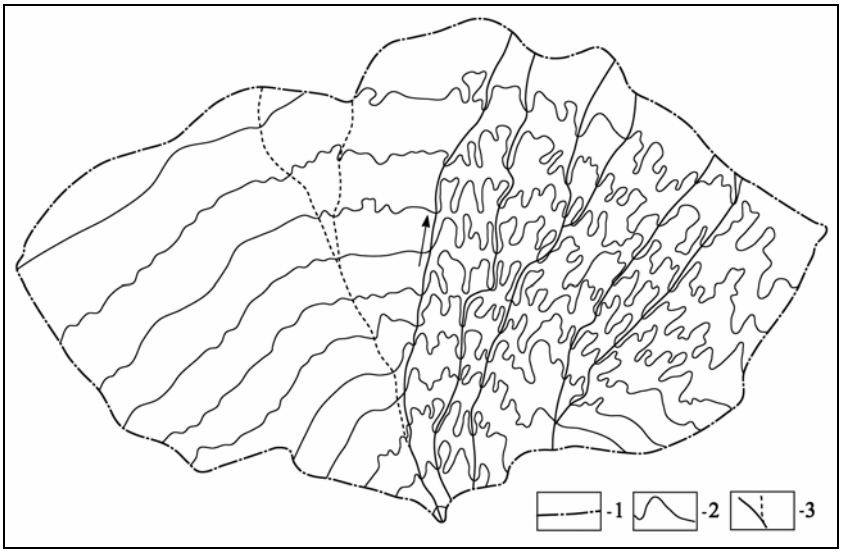


Рисунок 2.21. Конус выноса р. Узынкаргалы.
1 – граница конуса выноса, *2* – горизонтали, *3* – водотоки

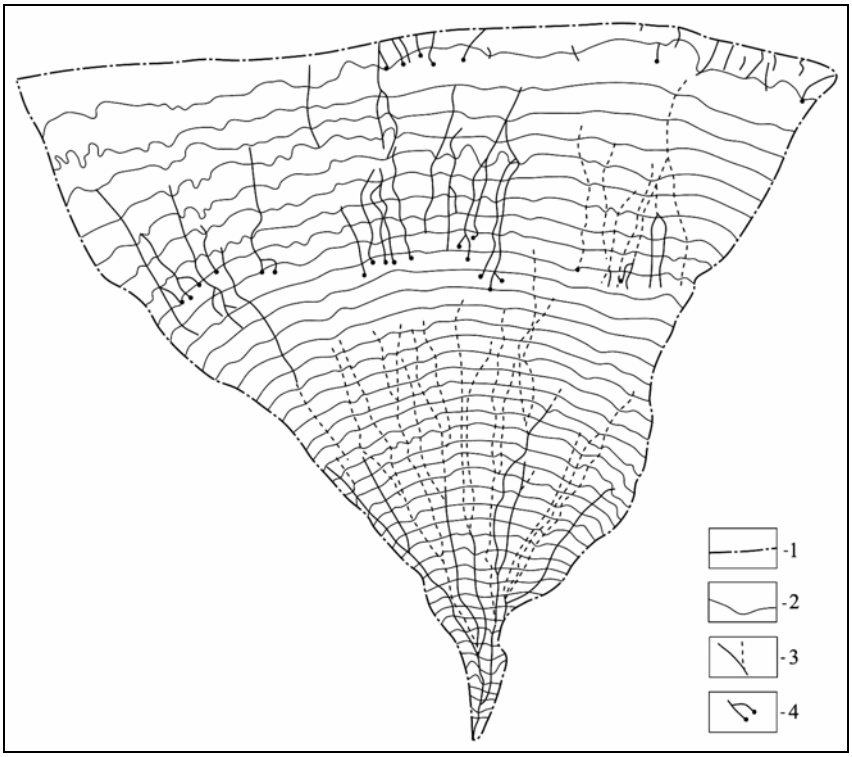


Рисунок 2.22. Конус выноса р. Аксай (хр. Таласский Алатау).
1 – граница конуса выноса, *2* – горизонтали, *3* – водотоки, *4* – родники

схема аллювиального конуса выноса, расположенного на селевом конусе выноса, который заканчивается выходом родников. Уклон аллювиального конуса выноса по всей длине относительно одинаков, форма горизонталей близка к дугам окружностей. Селевой конус выноса заканчивается заболоченными участками, выходом родников, его уклон к периферии уменьшается и принимает значение уклона предгорной равнины, примыкающей к подошве конуса выноса, форма горизонталей имеет небольшую кривизну.

Конусы выноса селевых бассейнов северного склона Иле Алатау приурочены в основном к высотной зоне 780–1100 м. В этой зоне происходит отложение всех фракций твердого компонента селевой массы. Уклон этой зоны составляет 1–3°. Продольные профили конусов выноса приведены на рисунке 2.23. Из рисунка видно, что уклон конусов выноса рек Каракастек, Узынкаргалы и Турген значительно меньше уклона всех остальных приведенных конусов выноса. Длина образующих конусов выноса изменяется от 5 до 18 км.

Верхняя часть конусов выноса сложена относительно крупными фракциями, периферийная – более мелкими. Некоторое отличие в крутизне объясняется тем, что мощные сели отлагаются на всем пути движения селя от вершины до периферии конуса выноса, а менее мощные – в верхней части. Этот эффект усиливается большей повторяемостью относительно

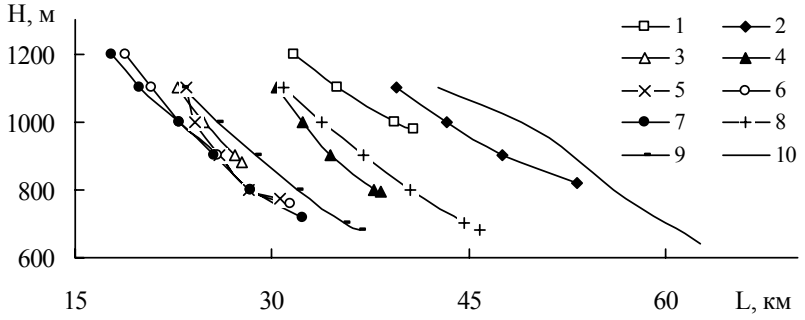


Рисунок 2.23. Продольные профили конусов выноса.
1 – Каракастек, *2* – Узынкаргалы, *3* – Шамалган, *4* – Каскелен, *5* – Аксай, *6* – Улькен Алматы, *7* – Киши Алматы, *8* – Талгар, *9* – Есик, *10* – Турген

небольших селей. Отличие гранулометрического состава верхней и периферийной частей конусов выноса обусловлено уменьшением глубины селевого потока по мере его движения. Следствием этого является отложение частиц, размеры которых превышают глубину потока.

Площади конусов выноса основных рек северного склона Иле Алатау изменяются от 12 до 180 км^2. Более информативной характеристикой селевой деятельности бассейнов является объем конусов выноса, поскольку при равных значениях их площадей уклоны конусов выноса могут отличаться (из-за различного минералогического и гранулометрического составов твердого компонента селевой массы) [70]. За объем конуса выноса принимается объем фигуры, заключенной между дневной поверхностью конуса выноса и наклонной плоскостью (подстилающей поверхностью), проходящей через подошву конуса выноса [71]. При определении объема конуса выноса наибольшие трудности возникают при выборе угла наклона этой плоскости. В зависимости от угла наклона плоскости объем конусов выноса сильно изменяется. Поскольку данные о реальных значениях угла наклона обсуждаемой плоскости отсутствуют, средний угол наклона был определен из следующих соображений.

Объем конусов выноса отражает закономерности переноса наносов из верхнего яруса накопления на средний ярус и является детерминированной величиной. Поскольку и до четвертичного периода на месте Иле Алатау располагался пусть и относительно небольшой горный массив, перенос наносов на предгорную равнину, наклоненную к северу, имел место. Следовательно, уклон поверхности, подстилающей конус выноса, должен превышать 0°. Наиболее вероятным углом наклона подстилающей поверхности является угол наклона равнины, примыкающей с севера к подошве конуса выноса. Эта равнина формировалась в процессе переноса и отложения наносов, транспортируемых реками северного склона Иле Алатау. Глинистые и пылевато-песчаные частицы уносились водными потоками за пределы конусов выноса и формировали предгорную равнину. Анализ картографического материала показал, что угол наклона предгорной равнины в северном направлении близок к 0°30′. Значение этого угла и было принято

при определении объема конусов выноса северного склона Иле Алатау. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что объемы конусов выноса изменяются от 800 до 11 400 млн $м^3$.

Известно, что конусы выноса аллювиального генезиса образуются на выходе рек из гор на предгорную равнину из-за уменьшения транспортирующей способности водных потоков, вызванной уменьшением уклона пути движения. В принципе конусы выноса могут и не формироваться, если размеры частиц, образующихся в процессе выветривания, настолько малы, что могут выноситься реками на более низкий ярус накопления, минуя предгорную равнину [72].

Относительно малая доля аллювия в общем твердом стоке, который формируется на северном склоне Иле Алатау и откладывается на конусах выноса, объясняется тем, что твердый сток, формирующийся на склонах долин, транспортируется относительно малыми водными потоками и поэтому легко выносится основными водотоками за конусы выноса [73].

В формировании конусов выноса северного склона Иле Алатау частично принимают участие и влекомые составляющие твердого стока горных рек. Преимущественно это частицы, размер которых не превышает 50 мм, их объемы незначительны. Объясняется это тем, что в большинстве они являются продуктами переработки (в руслах рек) отложений небольших селей, останавливающихся в горных долинах. Лишь в бассейнах рек, в которых сейсмическая активность проявляла себя в наибольшей мере, доля аллювиальных отложений может возрастать за счет твердых частиц, образующих осыпи, опускающиеся к руслам рек. Однако такая ситуация наблюдается в Иле Алатау преимущественно в бассейнах рек Ассы, Есик и Узынкаргалы (рисунок 2.24).

Поскольку геоморфологический подход к определению генезиса конусов выноса основывался только на результатах физического моделирования, его верификация проведена по результатам изучения геологического строения карьера нерудных материалов, расположенного на конусе выноса р. Аксай (северный склон Иле Алатау), а также гранулометрического состава селевых и аллювиальных отложений других рек изучаемого района. Карьер на конусе выноса р. Аксай расположен в его средней части, длина карьера – около 2 км, ширина – до 500 м, глубина – до 60 м (рисунки 2.25, 2.26).

Особенностью аллювиальных отложений является незначительное содержание в их составе пылевато-глинистых частиц (размеры которых не превышают 0,05 мм), вымываемых и уносимых водами рек (таблица 2.1). На это указывает относительно низкое содержание частиц с размерами менее 0,05 мм в составе фракций <0,25 мм, характерное для аллювиальных отложений. Даже в аллювии поймы р. Киши Алматы, заливаемой водными паводками, несущими значительное количество пылевато-глинистых частиц, смываемых ливнями с поверхности низкогорья, среднее содержание фракций <0,05 мм не превышает 11 % в составе частиц с размерами <0,25 мм. Гранулометрический состав мелкозема аллювия рек Аксай и Узынкаргалы приведен в таблицах 2.2 и 2.3.

Рисунок 2.24. Осыпь, спускающаяся к руслу р. Узынкаргалы

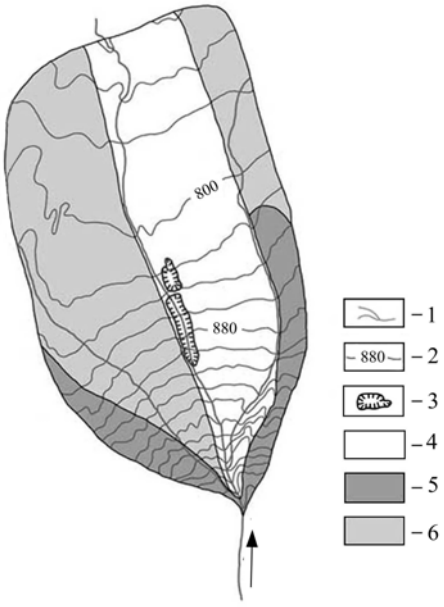


Рисунок 2.25. Конус выноса р. Аксай.
1 – река; *2* – горизонтали; *3* – карьер; *4* – селевые отложения голоцена;
5 – мощность лёссового покрова до 3 м; *6* – мощность лёссового покрова до 20 м

Рисунок 2.26. Общий вид средней части карьера
на конусе выноса р. Аксай

Таблица 2.1. Содержание частиц в гранулометрическом составе
мелкозема аллювиальных отложений (бассейн р. Киши Алматы), %

№ пробы	Фракции, мм				*k*
	0,001-0,05	0,05-0,25	0,25-0,5	0,5-1,0	
1	1,50	39,9	44,7	13,9	0,038
2	1,12	22,7	43,18	33,0	0,049
3	0,60	14,3	48	37,1	0,042
4	2,20	19,7	46	32,1	0,11
5	0,82	22,2	48,38	28,6	0,037
6	1,35	22,4	42,75	33,5	0,06
7	0,87	22,2	49,43	27,5	0,039
8	1,00	22,1	47,6	29,3	0,045
9	0,73	20,8	48,87	29,6	0,035
10	1,43	20,5	48,37	29,7	0,07
11	0,57	21,4	51,03	27,0	0,027
12	0,89	20,9	46,31	31,9	0,042
13	1,60	19,3	43,6	35,5	0,083
14	1,00	21,1	43,5	34,4	0,047
15	1,60	25,6	45,4	27,4	0,062
Среднее	1,15	22,3	46,47	30,0	0,05
Ср. кв. откл.	0,44	5,41	2,55	5,43	0,02

Примечание. *k* – отношение содержания фракций 0,001-0,05 мм к содержанию фракций 0,05-0,25 мм.

Таблица 2.2. Содержание частиц в гранулометрическом составе мелкозема аллювиальных отложений (бассейн р. Аксай), %

№ пробы	Фракции, мм		*k*
	0,001-0,05	0,05-0,25	
1	0,35	71,3	0,005
2	1,35	35,5	0,038
3	0,3	20,85	0,014
4	0,25	28,55	0,009
5	0,22	17,85	0,012
Среднее	0,49	34,8	0,0158
Ср. кв. откл.	0,48	21,5	0,013
Примечание. *k* – отношение содержания фракций 0,001-0,05 мм к содержанию фракций 0,05-0,25 мм.			

Таблица 2.3. Содержание частиц в гранулометрическом составе мелкозема аллювиальных отложений (бассейн р. Узынкаргалы), %

№ пробы	Фракции, мм				*k*
	0,001-0,05	0,05-0,25	0,25-0,5	0,5-1,0	
1	0,13	10,9	38,77	50,2	0,012
2	0,16	12,2	33,44	54,2	0,013
3	0,15	9,2	33,25	57,4	0,016
4	0,16	9,2	34,74	55,9	0,017
5	0,13	18,8	46,97	34,1	0,007
6	0,28	16,4	40,82	42,5	0,017
Среднее	0,168	12,8	38,0	49,0	0,014
Ср. кв. откл.	0,056	3,97	5,38	9,07	0,0039
Примечание. *k* – отношение содержания фракций 0,001-0,05 мм к содержанию фракций 0,05-0,25 мм.					

Анализ гранулометрического состава мелкозема р. Аксай и других рек северного склона Иле Алатау показал, что их генезис характеризуется следующим отношением:

$$k = \frac{A}{B}, \qquad (2.2)$$

где A – содержание частиц с диаметром 0,001–0,05 мм, %; B – содержание частиц с диаметром 0,05–0,25 мм, %.

Для аллювиальных отложений среднее k=0,016, среднее квадратическое отклонение составляет 0,0198.

В таблице 2.4 приведены сведения о гранулометрическом составе мелкозема селевых отложений бассейна р. Аксай. За селевые принимались отложения, гранулометрический состав мелкозема в которых незначительно отличался от гранулометрического состава селеформирующих пород, характерных для бассейна р. Аксай.

Для селевых отложений среднее k=0,67. Среднее квадратическое отклонение составляет 0,184. Такие значения k типичны не только для селевых бассейнов северного склона Иле Алатау, но также и для многих селевых бассейнов СССР (таблица 2.5).

Таблица 2.4. Содержание частиц в гранулометрическом составе мелкозема селевых отложений (бассейн р. Аксай), %

№ пробы	Фракции, мм		*k*
	0,001-0,05	0,05-0,25	
1	5,3	5,86	0,90
2	11,0	14,1	0,78
3	20,7	20,5	1,0
4	12,8	23,3	0,55
5	39,1	47,6	0,82
6	26,3	37,5	0,70
7	24,6	36,5	0,68
8	14,9	26,2	0,57
9	24,4	38,0	0,64
10	10,8	39,9	0,27
11	5,8	23,1	0,25
12	7,6	16,3	0,47
13	11,5	21,1	0,54
14	7,8	18,0	0,43
15	13,3	21,7	0,61
16	15,5	28,8	0,54
17	8,9	13,8	0,65
18	7,1	10,1	0,71
19	10,4	16,9	0,62
20	11,4	18,6	0,61
21	17,1	13,4	1,28
22	6,6	11,0	0,60
23	3,7	6,1	0,60
24	11,1	13,5	0,82
25	9,9	12,6	0,78
26	8,2	13,8	0,60
27	14,3	24,6	0,58
28	8,5	14,4	0,59
29	18,4	22,8	0,81
30	12,2	17,0	0,72
31	15,6	21,9	0,71
32	34,9	63,4	0,55
33	10,2	11,9	0,86
Среднее	14,0	22,0	0,64
Ср. кв. откл	8,16	12,4	0,19

Примечание. k – отношение содержания фракций 0,001-0,05 мм к содержанию фракций 0,05-0,25 мм.

Таблица 2.5. Содержание частиц в гранулометрическом составе мелкозема селеформирующих пород в различных селевых бассейнах СССР, %

Место отбора пробы	Фракции, мм		*k*
	0,001-0,05	0,05-0,25	
Плато Путорана, бассейн озера Аян	4,5	5,5	0,82
Хр. Сихотэ-Алинь, бассейн р. Кема	0,95	1,05	0,90
Хр. Западный Саян	2,5	3,5	0,71
Хр. Хамар-Дабан	5,0	15,0	0,33
Хр. Кодар	2,0	10,0	0,2
Камчатка, бассейн р. Сухая Капица	3,5	9,5	0,37
Крым	28,0	3,0	9,3
Заалайский хребет	6,0	6,0	1,0
Урочище Бардобе (Памир)	10,5	16,5	0,64
Чуст-Папские адыры	60	21,0	2,86
Р. Турген, Иле Алатау	11,0	9,5	1,16
Горный Алтай	14,0	3,0	4,7
Сай Оби Шур, бассейн р. Вахш, очаг с преобладанием в коренных породах песчаника	4,8	2,4	2,0
Сай Оби Шур, бассейн р. Вахш, очаг с преобладанием в коренных породах аргиллитов и алевролитов	6,0	3,8	1,6
Сай Оби Шур, бассейн р. Вахш, отложения древнего селевого потока на левом склоне долины сая Оби Шур в 700 м выше устья	4,4	2,5	1,76
Среднее	10,9	7,48	1,89
Ср. кв. откл	15,2	6,0	2,36
Примечание. *k* – отношение содержания фракций 0,001-0,05 мм к содержанию фракций 0,05-0,25 мм.			

На рисунке 2.27 приведены гранулометрические кривые отложений (ограниченных размером 1 мм), представленных на рисунке 2.28. Из рисунка 2.27 следует, что содержание в аллювии частиц с размерами менее 0,1 мм не превышает 2 %, в то время как в селевых отложениях может превышать 20 %.

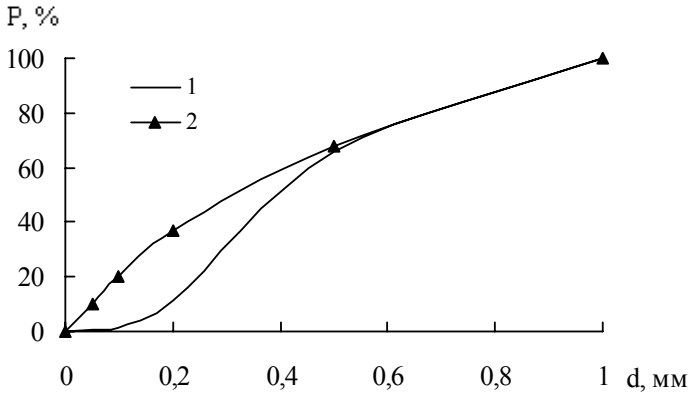


Рисунок 2.27. Гранулометрический состав мелкозема аллювиальных (*1*) и селевых (*2*) отложений на конусе выноса р. Киши Алматы

Рисунок 2.28. Стенка котлована, вырытого на пересечении улиц Наурызбай батыра и Шевченко (юго-западный угол перекрестка, конус выноса р. Киши Алматы)

Поперечные размеры наиболее крупных из них могут превышать размеры мельчайших частиц в 10^{10} раз. Наличие в селевой массе воды и частиц с размерами более 0,001 мм придает ей свойство вязкости, а присутствие самых мелких фракций – глинистых частиц – свойство пластичности. Благодаря турбулентному перемешиванию и пластичности вмещающей среды твердые частицы могут находиться в квазивзвешенном состоянии, селевую массу при этом допустимо рассматривать как «тяжелую» жидкость.

Ответ на вопрос о принадлежности глыб к речным или селевым отложениям на конусах выноса может быть получен на основе закона Эри [74]

$$\frac{V_{\max}^2}{gd} = 15, \qquad (2.3)$$

где V_{max} – максимальная скорость потока, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с^2; d – размер частицы, м.

Расчеты показывают, что для приведения в движение частиц размером 2 м на уклоне 3º необходима скорость, близкая к 17 м/с. Это возможно при глубине потока, равной 60 м. Такая глубина потока на конусе выноса возможна лишь при расходе несколько миллионов кубометров в секунду, что нереально.

Как отмечалось, скорость движения крупных фракций в составе селевого потока не отличается от скорости селевого потока в целом. Следовательно, причиной передвижения глыб не является динамическое воздействие на них селевой массы, обладающей вязкопластическими свойствами. То обстоятельство, что наиболее крупные частицы, входящие в состав селевой массы, находятся в среде, обладающей плотностью, которая может изменяться от плотности воды до плотности, близкой к плотности твердого компонента, позволяет по-новому объяснить механизм перемещения крупных фракций твердого компонента селевой массы, обладающих наибольшей разрушительной способностью.

Архимедова сила, действующая на частицу, определяется по формуле

$$F_{apx} = \frac{1}{6}\pi d^3 \{\rho_T C(1-k) + \rho_o [1 - C(1-k)]\} g , \qquad (2.4)$$

где d – размер частицы, м; ρ_T и ρ_o – плотность твердых частиц и воды соответственно, кг/м^3; C – объемная концентрация частиц в селевой массе, доли ед.; k – доля частиц, размеры которых превышают размер частицы, для которой определяется величина архимедовой силы.

Угол, на котором произойдет сдвиг частицы (коэффициент трения принят равным 0,6), погруженной в «тяжелую» жидкость, находится из выражения

$$tg\alpha = \frac{0{,}6(\rho_T - \rho_{см})}{\rho_T} , \qquad (2.5)$$

где ρ_T и $\rho_{см}$ – плотность твердых частиц и селевой массы, включающей в себя воду и частицы, размер которых меньше, чем размер частиц, для которых определяется угол сдвига, кг/м^3.

Снижение нормального давления за счет действия архимедовой силы приводит к значительному уменьшению угла наклона русла, на котором крупные частицы могут самостоятельно перемещаться только за счет действия на них продольной составляющей силы тяжести (таблица 2.6).

Таблица 2.6. Зависимость угла, на котором происходит сдвиг частиц, от плотности среды, их вмещающей

ρ_T, кг/м^3	$\rho_{см}$, кг/м^3	$(\rho_T - \rho_{см})$, кг/м^3	$tg\alpha = \frac{0{,}6(\rho_T - \rho_{см})}{\rho_T}$	α
2650	1000	1650	0,373	20º30′
2650	1200	1450	0,328	18º10′
2650	1600	1050	0,237	13º20′
2650	2000	650	0,147	8º20′
2650	2200	450	0,102	5º00′
2650	2400	250	0,0396	2º20′
2650	2500	150	0,0237	1º20′

Таким образом, наличие в составе отложений на конусе выноса глыб, а также выполнение соотношения $k = \frac{A}{B}$, характерного для селевых отложений, позволяет сделать однозначный вывод о том, что это отложения селя.

Соотношение объема аллювиальных и селевых отложений, слагающих конусы выноса рек северного склона Иле Алатау, оценивалось на примере конуса выноса р. Аксай. Экспертной оценке генезиса рыхлообломочных пород, слагающих борта Аксайского карьера, подверглось около 50 тыс. м^2 практически вертикальных откосов, образующихся в процессе выемки грунта, используемого после соответствующей переработки при строительстве зданий и дорог.

В качестве критериев при отнесении наносов к селевым отложениям принимались:

наличие в составе отложений частиц, размеры которых превышают 500 мм;

большое содержание пылевато-глинистых частиц, которые при высыхании грунта придают ему сцепление, существенно затрудняющее отбор проб для гранулометрического анализа мелкозема (частицы с размерами менее 1 мм);

ярко выраженная слоистость отложений при наличии в них крупных фракций, произвольно ориентированных в пространстве;

мощность слоев отложений, близкая или превышающая размеры максимальных частиц, в них содержащихся.

За критерии аллювиальных отложений принимались:

отсутствие в отложениях частиц, размеры которых превышают 500 мм;

практически полное отсутствие сцепления между частицами мелкозема и мелкозема с крупными частицами;

низкое содержание пылевато-глинистых частиц в составе частиц, размер которых не превышает 0,25 мм.

Образцом отложений, селевой генезис которых не вызывает сомнений, может служить глыба, размер которой превышает 2 м (рисунок 2.29). Нетрудно видеть, что на вертикальной стенке глыбы удерживается (за счет сцепления, обеспечиваемого пылевато-глинистыми частицами) валун, размер которого близок к 0,7 м.

Сцепление в селевых (в том числе даже существенно увлажненных) отложениях настолько велико, что из вертикальных стенок не вываливаются глыбы размером не менее 1 м, большая часть объема которых выступает за пределы откоса (рисунок 2.30).

В то же время из отложений аллювиального генезиса под действием силы тяжести выпадают даже мелкие частицы, в том числе фракции мелкозема (см. рисунок 2.28). На этом рисунке показан фрагмент стенки котлована, где присутствуют лёсс, отложения селя и аллювий. Видно, как отложения селя нависают над осыпающимся слоем аллювия. Возраст отложений селя и аллювия – 20–25 тыс. лет.

Рисунок 2.29. Глыба, на вертикальной стенке которой
удерживаются валуны размером около 0,7 м

Рисунок 2.30. Глыба, выступающая за поверхность откоса карьера

Оценка генезиса отложений, вскрытых Аксайским карьером, показала, что подавляющая часть объема конуса выноса (более 90 %) представлена селевыми отложениями. В тех случаях, когда генезис тех или иных отложений вызывал сомнение, пробы отбирались на гранулометрический анализ. В таблицах 2.1–2.4 приведены результаты гранулометрического анализа проб, которые характеризуют индивидуальные особенности отложений.

Из таблицы 2.4 следует, что наиболее часто встречающиеся соотношения содержания фракций 0,001–0,05 и 0,05–0,25 мм в гранулометрическом составе селевых отложений на конусе выноса р. Аксай составляют 0,5–0,9.

Результаты анализа гранулометрического состава образцов, вызывавших сомнение в их принадлежности к селевым отложениям, свидетельствовали о том, что большинство из проб относятся к отложениям селей.

По данным таблиц 2.1–2.3, соотношение фракций 0,001–0,05 и 0,05–0,25 мм в аллювиальных отложениях на порядок, а то и почти на два порядка меньше, чем в отложениях селей.

В рамках гипотезы, в соответствии с которой конусы выноса подстилаются плоскостями, наклоненными к горизонту под углом наклона предгорной равнины, были подсчитаны объемы всех крупных конусов выноса рек северного склона Иле Алатау (таблица 2.7). Нетрудно видеть, что объемы конусов выноса существенно разнятся: от 0,8 км^3 (р. Каракастек) до 11,4 км^3 (р. Турген). Поскольку конусы выноса образованы в основном в результате отложения селей, имеются все основания утверждать, что в той же мере отличаются и величины селевой активности бассейнов рек северного склона Иле Алатау.

Таблица 2.7. Объем и некоторые другие морфометрические характеристики конусов выноса рек северного склона Иле Алатау

Река	Площадь бассейна, км^2	Площадь конуса выноса, км^2	Объем конуса выноса, км^3	Продольный уклон конуса выноса, ‰
Каракастек	212	52,9	0,8	21,4
Узынкаргалы	388	124,6	4,93	20,4
Шамалган	139	12,2	0,35	41,5
Каскелен	300	25,1	1,16	31,7
Аксай	124	39,6	1,32	34,0
Улькен Алматы	256	71,6	7,58	33,8
Киши Алматы	107	41,5	2,55	36,7
Талгар	444	175,9	10,3	29,6
Есик	293	162,0	9,5	29,6
Турген	583	176,0	11,4	23,3

Было также установлено, что объемы конусов выноса рек Аксай, Каскелен, Шамалган, Узынкаргалы в 2–2,5 раза меньше, чем это следует из выявленной закономерности изменения объемов конусов выноса от упомянутых выше факторов. Объясняется это тем, что вершины конусов выноса рек Есик, Талгар, Киши и Улькен Алматы практически примыкают к коренной части хребта. Поэтому их объемы характеризуют суммарную

селевую активность на протяжении всего плейстоцена. Конусы выноса рек Аксай, Каскелен, Шамалган и Узынкаргалы примыкают к выходу долин, сформировавшихся в верхней предгорной ступени. Верхняя предгорная ступень представляет собой отложения (в том числе древние конусы выноса упомянутых рек), образованные в первой половине плейстоцена, поднятые на высоту 200–1000 м над предгорной равниной в результате тектонических движений. В первом приближении можно принять их объемы, как минимум, равными объемам отложений во второй половине плейстоцена.

Таким образом, зная объемы и генезис отложений на конусах выноса, произошедших за определенные периоды времени, можно оценить селевую активность селевых бассейнов. Как правило, вынос наносов не имеет тотального характера, в долинах рек остаются заплечики морен основных ледников, а то и значительная часть морен. Реконструкция морен позволяет оценить их первоначальный объем и объем вынесенного материала. Сравнение объема вынесенного материала с объемами отложений на конусах выноса за одинаковые периоды времени делает возможной оценку погрешности определения объемов отложений на конусах выноса и, следовательно, в значительной мере погрешности оценки селевой активности.

2.4. Взаимодействие факторов селеформирования

Влияние любого фактора селеформирования на образование селя не является абсолютным. Его действие относительно и меняется в зависимости от конкретной обстановки. По существу, изменчивость каждого фактора селеформирования имеет две стороны: изменчивость самого фактора и его действия.

При оценке степени влияния климата на селевую активность целесообразна его классификация на глобальный климат, макроклимат и мезоклимат [75]. Глобальный климат – ансамбль состояний (или режима) метеорологической составляющей системы «атмосфера – океан – суша – криосфера», который она проходит за длительное время (не менее нескольких десятилетий). В четвертичном периоде крупнейшие перестройки глобального климата Земли происходили при переходе от ледниковий к межледниковьям и наоборот. Среднегодовая температура воздуха в Антарктиде за последние 164,4 тыс. лет изменялась от –9,1 до 2,7 °С [76].

Макроклимат характеризует общеклиматические условия региона (горной страны) с помощью климатических показателей в форме предела изменения этих условий. Например, количество осадков от 200 до 1000 мм, среднегодовая температура воздуха от –9,2 до 7,2 °С и т.д. Вариации этих показателей объясняются общими закономерностями изменений циркуляционных и радиационных процессов в связи с поднятием местности.

Мезоклиматы – климатические единицы, из которых слагается климат региона (горной страны). Такими единицами могут быть, например, климатические показатели высотных зон. Последовательная, по мере поднятия вверх, смена климатических зон (вертикальная зональность климата) характерна для всех горных областей, за исключением Антарктиды.

Горные системы вследствие влияния особенностей рельефа на атмосферную циркуляцию и адвекцию воздушных масс создают условия не только для формирования специфического климата внутри горных стран, но и оказывают существенное влияние на климат и погоду прилегающих районов. Следствием этого является большая неравномерность (пятнистость) в пространственном распределении метеорологических элементов, особенно осадков. На климат гор, кроме важнейших факторов – географической широты и атмосферной циркуляции, влияют абсолютная высота местности, тип рельефа, экспозиция склонов.

Так, годовая норма осадков на северном склоне Иле Алатау, по показаниям суммарных осадкомеров на леднике, достигает 1300 мм [77]. С уменьшением абсолютных высот количество осадков снижается: метеорологическая станция «Алматы ОГМО» – 575 мм; метеорологическая станция «Или, ж.-д. станция» – 261 мм. Это различие, в свою очередь, оказывает существенное влияние на режим поверхностных и подземных вод, особенности развития растительности, формирования почв и т.д.

Радиационный баланс, как правило, с высотой местности уменьшается. На ледниках, прежде всего из-за увеличения альбедо, он становится отрицательным. В средних широтах южные склоны получают намного больше солнечной энергии, чем северные. Большие различия в нагревании склонов проявляются в их ландшафтах. Так, на северном склоне Иле Алатау затененные склоны до высоты 2700–2800 м лесисты, а склоны, обращенные к солнцу, в основном имеют степную растительность.

Влияние ориентации склонов, их высотных отметок на количество выпадающих осадков хорошо прослеживается на примере Иле Алатау и прилегающих к нему гор. Располагаясь на пути движения влагонесущих воздушных масс, северные склоны Иле Алатау характеризуются значительным увлажнением. Так, на высоте 2500 м выпадает в два с лишним раза осадков больше, чем на этой же высоте в горных районах, расположенных к юго-востоку и востоку от Иле Алатау и окруженных почти со всех сторон высокими горными хребтами. На рисунке 2.31 представлены данные об изменении слоя годовых сумм осадков в зависимости от высоты местности на северном склоне Иле Алатау. Нетрудно видеть, что увеличение осадков происходит до высоты 3500–3600 м. Соотношение сумм жидких и твердых осадков в зависимости от высоты показано на рисунке 2.32 [78].

Абсолютная высота местности влияет на степень континентальности местного климата, что, в свою очередь, сказывается на темпах физического и химического выветривания горных пород. В не меньшей мере на скорость химического и физического выветривания влияет экспозиция рельефа. Склоны южной экспозиции имеют, как правило, сглаженные формы. Гранулометрический состав элювиальных и коллювиальных отложений на них представлен в значительной мере пылевато-глинистыми и песчаными частицами. Напротив, в составе склоновых отложений северной экспозиции преобладают щебенисто-глыбовые и глыбовые фракции.

Формы рельефа, их экспозиция, затененность отдельных участков рельефа оказывают большое влияние на размеры оледенения. Сами же формы

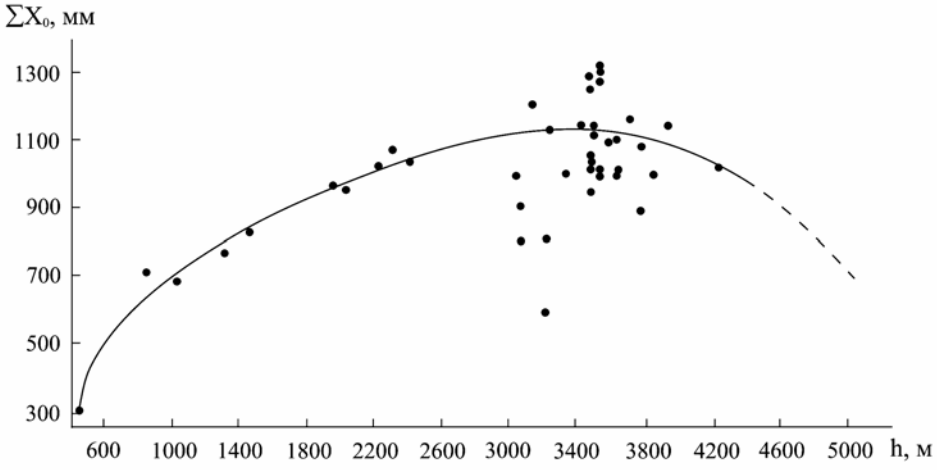


Рисунок 2.31. Распределение атмосферных осадков с высотой на северном склоне Иле Алатау (1957–1974 гг.)

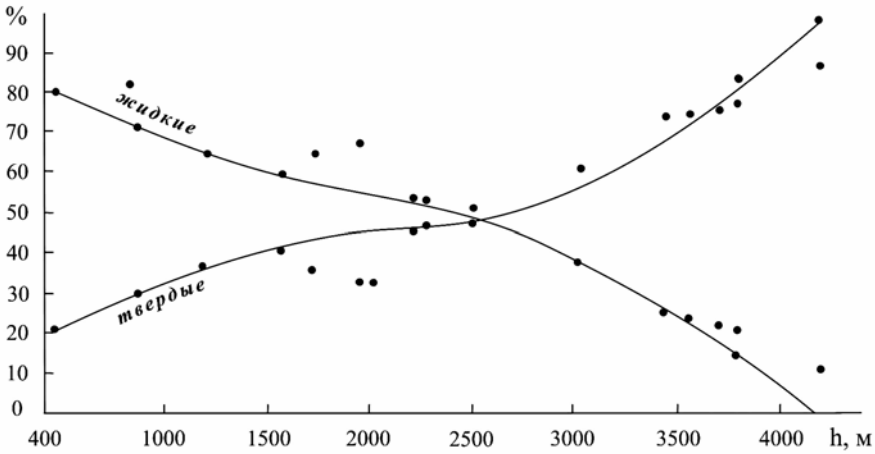


Рисунок 2.32. Изменение твердых и жидких осадков в зависимости от высоты (северный склон Иле Алатау)

рельефа в значительной мере являются результатом деятельности ледников [79]. Большая часть долин Иле Алатау представляет собой троги, образованные в результате эрозионной деятельности ледников. В настоящее время основные их части свободны от ледников, но сохранились частично морены рисского и практически полностью морены вюрмского оледенений. На северном склоне Иле Алатау конечные морены рисского оледенения расположены на высоте 1600–1800 м, вюрмского – на высоте 2400–2600 м. В Иле Алатау морены являются основным источником твердого компонента селей.

Геологический и геоморфологический факторы, например состав и свойства коренных пород, тип рельефа, глубина и густота расчленения, наклон склонов, уклоны дна речных долин и селевых очагов, контролируют состав и свойства селеформирующих грунтов. Они определяют масштабы

их накопления, а в сочетании с гидрометеорологическим фактором – тип, объем и повторяемость селей. Наибольшее влияние на упомянутые характеристики селей оказывает климат.

Селевые потоки являются одним из ландшафтообразующих факторов. В свою очередь, ландшафты в значительной мере определяют условия образования селей. В ландшафтных зонах действие селеформирующих факторов может быть как однонаправленным, так и разнонаправленным. Например, наличие травянистой растительности увеличивает начальные потери стокообразования, тем самым уменьшая поверхностный сток. Однако при отмирании ее корневой системы в почвогрунтах образуются каналы, способствующие их быстрому обводнению, что приводит к сдвигу водонасыщенных грунтов. При длительном выпадении жидких осадков низкой интенсивности на поверхность ледника сток с его поверхности может даже уменьшиться за счет перехвата солнечной радиации облаками. Однако при интенсивных кратковременных теплых дождях таяние льда за счет тепла дождевых вод может скомпенсировать потери радиации [80].

Увлажнение грунтов сглаживает гидрограф паводков, но приводит к аккумуляции воды в грунтах, что может способствовать лавинообразному нарастанию расхода и объема селей [12]. Увлажнение грунтов приводит и к уменьшению сцепления, способствующего потере устойчивости грунтов на склонах, формированию оползней и их трансформации в сели.

Современный климат высокогорья не благоприятен для активизации селей дождевого генезиса вследствие выпадения осадков в основном в твердом виде. Однако наличие моренно-ледниковых комплексов становится причиной возможности формирования селей гляциального генезиса.

Снег и лед в значительной мере блокируют действие других агентов денудации. В то же время лавины и ледники сами принимают активное участие в процессах эрозии, транспортировки и складирования рыхлообломочного материала.

Большие уклоны северных склонов среднегорной зоны Иле Алатау и их обращенность к влагонесущим воздушным массам благоприятствуют селеформированию. Однако высокая влажность и относительно небольшая солнечная радиация способствуют произрастанию лесолуговой растительности, уменьшающей селевую опасность.

Разнопланово может проявляться и тектонический фактор. Так, аномально высокая тектоническая активность в бассейне р. Есик настолько уменьшила прочность горных пород, что скорость денудации в этом бассейне увеличилась почти вдвое по сравнению с другими бассейнами северного склона Иле Алатау. В результате объем конуса выноса р. Есик имеет вдвое больший объем, чем он имел бы в условиях ординарной тектонической активности [59].

Число примеров взаимного влияния селеформирующих факторов можно было бы значительно увеличить. Однако, слегка перефразируя М. В. Тронова [80], можно утверждать, что в комплексе взаимодействующих факторов селеформирования влияние каждого из них, каким бы он не казался определяющим, может очень сильно изменяться.

Глава 3

СЕЛЕВАЯ МАССА

Селевая масса – сложное реологическое тело, к которому с полным основанием относится высказывание родоначальника науки о деформациях и текучести сплошных сред М. Рейнера о том, что «… любой реальный материал обладает всеми реологическими свойствами, выраженными в разной степени» [81]. В реологии к фундаментальным свойствам относят упругость, вязкость и пластичность. Все другие механические свойства тел являются проявлением сочетания фундаментальных свойств.

Широкий диапазон размера частиц горных пород (от долей микрона до 10 м и более), принимающих участие в формировании селевой массы, практически исключает возможность создания приборов, позволяющих непосредственно измерять реологические свойства селевой массы. Считается, что объем рабочей области приборов для измерения этих свойств должен в миллион раз превышать объем максимальной частицы, принимающей участие в формировании свойств селевой массы. Исключается и способ моделирования селевой массы, состоящий в пропорциональном уменьшении размера всех частиц твердого компонента селевой массы на 2–3 порядка, поскольку такое уменьшение размера пылевато-глинистых и песчаных частиц приводит к качественным изменениям свойств селевой массы.

Это обстоятельство, а также необоснованная замена реального состава селевой массы моделями, содержавшими преимущественно коллоидные частицы, привело к приписыванию селевой массе «особых» свойств: «селевое состояние», «поддерживающая сила структурной селевой массы», «угол растекания», в то время как эти «свойства» – не более чем проявление вязкопластических свойств селевой массы. В некоторых работах авторов, заслуженно считающихся основоположниками селеведения в СССР, можно встретить утверждение о том, что «… селевая масса … в структурном состоянии … качественно отличается от жидкости, не подчиняясь закону Архимеда», что «для селевых растворов, … где вступают в силу явления коллоидно-структурного порядка, само понятие взвешивающей способности в архимедовом смысле этого слова теряет всякое значение …» [82]. На самом же деле закон Архимеда в полной мере проявляется при помещении тел в вязкопластические среды. Тот же факт, что камни, будучи помещенными в глинистый раствор определенной консистенции, могут находиться в равновесном состоянии, объясняется не «селеустойчивостью», а вязкопластическими свойствами коллоидных растворов.

Ошибочным был вывод и о «физическом тождестве эффективной вязкости селевой массы и ее начального (предельного) сопротивления сдвигу»,

на основе которого утверждалось, что «… основными физическими свойствами селевой массы, позволяющими крупным тяжелым включениям находиться в ней во взвешенном состоянии, являются вязкость и плотность массы» и что «минимальное критическое значение вязкости, обусловливающее структурированность селевой массы и способность ее удерживать в себе крупные тяжелые включения, колеблется от 2,5 до 3,5 П, составляя в среднем 3 П» [82]. Если плотность тела, помещенного в жидкость, больше ее плотности, тело будет тонуть. От вязкости жидкости будет зависеть только скорость падения тела. Наглядным примером может служить опыт с сургучом, который при комнатной температуре кажется твердым телом, хотя является жидкостью. Шарик, помещенный в сургуч, со временем утонет или всплывет в зависимости от того, какова его плотность: больше или меньше плотности сургуча.

Недооценивалась и роль гранулометрического состава твердого компонента в формировании свойств селевой массы. В основном она сводилась к определению весового содержания фракций более 1 мм и их среднего размера. Не случайно, что в монографиях, рекомендовавшихся для широкого круга читателей, не приведены полные гранулометрические кривые горных пород, принимающих участие в селеформировании.

Акцент на недостатках публикаций 30–40-летней давности обусловлен тем, что монографии, представляющие библиографическую ценность, являются до настоящего времени основным источником знаний о природе селевых явлений, определяя качество проектирования селезащитных сооружений.

КазНИГМИ в течение нескольких десятилетий, вплоть до распада СССР, являлся головной организацией по изучению селей в системе Госкомгидромета СССР. Это позволяло проводить полевые экспедиционные исследования в целях оценки условий формирования селей на всей территории СССР: от Камчатки и Сахалина на востоке до Карпат на западе и от Северного Ледовитого океана на севере до Памира на юге. Результаты полевых исследований свидетельствовали (наряду с гидрометеорологическими условиями, а также энергией рельефа и ее градиентом) об исключительно важной роли в селевых процессах гранулометрического состава селеформирующих пород, а также минералогического состава их пылевато-глинистых фракций. Было установлено, что региональные особенности селепроявлений объясняются именно гранулометрическим и минералогическим составами твердого компонента селевой массы, в решающей мере определяющими реологические свойства селевой массы.

Селевая масса представляет собой неоднородное вещество, состоящее в общем случае из газового, жидкого и твердого компонентов. Соотношение между этими компонентами определяет свойства селевой массы и, следовательно, в значительной степени поведение селя. Описание важнейших сторон селевых процессов, таких, как формирование селей в результате взаимодействия водного потока с рыхлообломочными породами или сдвиг селеформирующих пород вследствие их увлажнения, трансформация характеристик селевых потоков, невозможно без наличия информации о вязкости

и предельном напряжении сдвига селевой массы и скорости ее распада. Стало очевидно, что эмпирические уравнения, устанавливающие зависимость тех или иных характеристик селей только от плотности селевой массы, носят в лучшем случае частный характер. Их применение в ситуациях, когда указанные характеристики твердого компонента селевой массы отличны от таковых, использовавшихся при установлении эмпирических зависимостей, недопустимо.

3.1. Состав селевой массы

«Классическими» компонентами селевой массы являются вода, горные рыхлообломочные породы и воздух. Вовлечение в селевой процесс продуктов хозяйственной деятельности, особенно связанных с горнорудной промышленностью, значительно расширило сферу объектов, участвующих в селеформировании. Это «хвосты» обогатительных фабрик, фрагменты разрушенных зданий и сооружений, древесные обломки и отходы лесной промышленности, автомобильные покрышки и т.д.

3.1.1. Газовый компонент

Данные о предельно возможной степени аэрации селевой массы отсутствуют. Однако наблюдения за процессами, сопровождающими течение горных рек на уклонах 10–30° в условиях, когда размеры шероховатости русел соизмеримы с глубиной потоков, показывают, что объемная концентрация газового компонента в водном потоке может составлять единицы и даже первые десятки процентов. Если плотность селевой массы такова, что характер движения селевого потока определяется вязкопластическими свойствами селевой массы (квазиламинарное течение), физические предпосылки для возникновения аэрации практически исчезают [83]. Правильность теоретических выводов подтверждается результатами наблюдений за особенностями движения селя на уклоне 0,051–0,068 на р. Каскелен в 1978 г. При глубине потока 1,5–2 м и поверхностной скорости 2–3 м/с поверхность селевого потока казалась практически плоской. Каких-либо поднятий над уровнем невозмущенной свободной поверхности, характерных даже для равнинных полноводных рек, не отмечалось. Не было замечено и выхода пузырей на поверхность селя.

Таким образом, если аэрация и играет какую-либо роль в селевых процессах, то ее влияние сказывается, прежде всего, на начальном этапе насыщения потока твердым компонентом. Характер воздействия аэрации на процесс взвешивания твердого компонента неоднозначен: архимедова сила уменьшается, однако всплывание пузырей способствует возникновению восходящих потоков. Сложность теоретического и экспериментального исследований обсуждаемого явления, малая вероятность существенного влияния реальной аэрации селевой массы на ход селевых процессов послужили причиной того, что единичные публикации, посвященные аэрации селевых потоков, носят постановочный характер.

3.1.2. Жидкий компонент

Важнейшим компонентом селевой массы является вода. При расчетах характеристик селевой массы плотность воды может приниматься равной 1000 кг/м^3, хотя она и зависит от ее температуры, достигая максимума при 3,98 ºС (т.е. при нагревании от 0 ºС объем воды не увеличивается, а уменьшается).

Вода характеризуется поверхностным натяжением, обусловленным силами притяжения между молекулами и возникающим на поверхности соприкосновения ее с воздухом, твердым телом или другой жидкостью. Поверхностное натяжение влияет на испарение, влажность снежного покрова и другие гидроледотермические явления.

Вода может выступать как в роли транспортирующего агента по отношению к твердому компоненту селевого потока (наносоводные сели), так и в качестве равноправного члена участвовать в формировании дисперсоида (смесь воды и твердых частиц, обладающая ярко выраженными вязкопластическими свойствами), движение которого классифицируется как грязекаменный (грязевой) сель.

Подобно воде в грунте (Е. М. Сергеев и др. [84]), в селевой массе вода может находиться в прочносвязанном, рыхлосвязанном, гравитационном и твердом состояниях. Гравитационная вода обладает всеми свойствами обычной воды, ее динамическая вязкость зависит от ее температуры.

Основная доля прочносвязанной воды удерживается пылевато-глинистыми частицами твердого компонента селевой массы. Гравитационная (свободная) вода обладает всеми свойствами обычной воды и перемещается под действием силы тяжести, образуя, в частности, пленку на частицах грунта. При наличии глинистых и гумусных частиц в селевой массе они, взаимодействуя с молекулами воды, образуют рыхлую структурную сетку, иммобилизующую в ее ячейках свободную воду. В процессе деформации селевой массы происходит частичное разрушение рыхлой структурной сетки, приводящее к «растеканию» иммобилизованной свободной воды и утолщению пленки воды на частицах грунта. При этом вязкость и предельное напряжение сдвига селевой массы существенно уменьшаются.

Адсорбционная способность частиц грунта находится в прямой зависимости от их суммарной поверхности. С уменьшением размера частиц удельная поверхность резко возрастает, поэтому граница текучести грунта зависит от содержания в нем тонкодисперсных частиц, прежде всего пылевато-глинистых.

При температуре воды ниже 0 ºС и давлении в одну атмосферу, она, застывая, превращается в лед. Переход воды из жидкого состояния в твердое сопровождается выделением теплоты кристаллизации, а обратный ему процесс (таяние льда) – поглощением теплоты плавления. Теплота плавления льда при температуре 0 ºС составляет 79,4 кал/г, теплота сублимации – 677 кал/г. Теплоемкость воды – 0,487 кал/(г·град) при 0 ºС. Плотность льда при 0 ºС равна 916,8 кг/м^3, поэтому лед, будучи погруженным в воду,

обладает плавучестью и не требует затрат энергии со стороны жидкого компонента на его перемещение в составе водоледяного потока.

Даже при небольшой нагрузке лед течет, что обусловлено его пластичностью. Упругие свойства льда проявляются лишь при весьма кратковременных нагрузках, разрушение льда происходит при изгибе от нагрузки около 15 кг/см^2. Прочность льда с понижением его температуры возрастает.

На реках с быстрым течением при отрицательной температуре воздуха образуется внутриводный лед, всплывание и движение которого получило название «шугоход». При взламывании ледового покрова во время весенних паводков образуются ледоходы. Скопление льдин в руслах, имеющих пониженную проходную способность, получило название «затор».

Атмосферный лед образует снежинки, град, снежную крупу. Подземный лед возникает при замерзании воды, аккумулирующейся в поровом пространстве рыхлообломочных пород, и представляет собой мономинеральную горную породу. При наличии благоприятных условий (скоплений грубообломочных масс, высокой степени заполнения их порового пространства льдом, больших уклонах) образуются каменные глетчеры, напоминающие горные ледники. Такие криогенные образования по масштабам перемещения рыхлообломочных пород в условиях современного климата могут превышать эрозионные процессы в высокогорье [85].

3.1.3. Твердый компонент

В качестве твердого компонента селевой массы выступают рыхлообломочные породы (в том числе вода в твердом состоянии), древесные обломки и продукты деятельности человека.

Гранулометрический и минералогический составы селеформирующих пород определяются геологическим и тектоническим строением селевых бассейнов, трансформацией монолитных массивов горных пород в рыхлообломочные. Результаты исследований последних десятилетий позволяют определить роль дисперсности гранулометрического состава рыхлообломочных пород в формировании селевого потока как одну из главнейших.

Широкий диапазон размера частиц селеформирующих пород (от глинистых частиц до крупных глыб) практически исключает возможность использования для расчета характеристик селевой массы каких-либо средних, медианных или модальных показателей. Из результатов исследований последних десятилетий следует, что ширина интервалов дискретизации фракционного состава рыхлообломочных пород не должна превышать рекомендуемые В. Н. Вардугиным [86].

Важная роль в формировании реологических свойств селевой массы принадлежит пылевато-глинистым частицам. Химический состав глин, входящих в состав морен, аллювиальных, пролювиальных и других отложений, весьма пестр и определяется минералогическим составом пород, слагающих селевые бассейны. Основными глинистыми минералами являются монтмориллонит, гидрослюды, каолинит. Коллоидные (пылевато-глинистые) частицы в силу их большой суммарной поверхности оказывают

большое влияние на поведение селевой массы в целом. Адсорбционная способность глинистых частиц объясняется наличием на их поверхности отрицательного заряда, способного связывать молекулы воды. Представление о воде, которая может быть связана различными глинистыми минералами, можно получить из таблицы 3.1 [87].

Таблица 3.1. Граница текучести некоторых глинистых пород

№	Глинистые минералы	Граница текучести, %
1	Na-монтмориллонит	700
2	Ca-монтмориллонит	177
3	Na-иллит	61
4	Ca-иллит	90
5	Na-каолинит	52
6	Ca-каолинит	73

В работе Л. И. Кульчицкого и О. Г. Усьярова [88] на основании экспериментальных данных показано, что проявление специфических глинистых свойств (пластичность, набухание) в дисперсной системе при взаимодействии с водой обусловлено не столько высокой дисперсностью, сколько особенностями кристаллохимии поверхности глинистых минералов. Физико-механические характеристики глинистых частиц зависят от их размеров и химического состава. Однако даже при близком химическом составе характеристики глин могут резко отличаться.

Средний удельный вес глин близок к 2740 кг/м^3, наиболее вероятные значения объемного веса глин 1750–2300 кг/м^3 [89].

Типичные гранулометрические кривые селеформирующих пород приведены на рисунке 3.1 [90]. Более подробные сведения о гранулометрическом составе селеформирующих пород можно найти в монографии А. Р. Медеу [91].

Гранулометрический состав твердого компонента селевой массы в решающей степени определяется составом селеформирующих пород, поэтому перемещение селевого потока по различным геолого-климатическим зонам селевого бассейна, сопровождающееся набором рыхлообломочных пород, может приводить к значительному изменению гранулометрического состава селевой массы. Например, селевой поток, зародившийся на современной морене Иле Алатау, в грунтах которой крайне невелико содержание пылевато-глинистых фракций, по мере движения попадает в зону древних морен, характеризующихся относительно большим содержанием пылевато-глинистых фракций. При дальнейшем движении селевого потока в среднегорной зоне вполне вероятным является захват грунтов, обогащенных гумусом. В низкогорной зоне помимо аллювиально-пролювиальных отложений в селевой процесс могут быть вовлечены лёссовидные суглинки.

Причиной изменения гранулометрического состава твердого компонента селевой массы могут быть механическое дробление и истирание обломков горных пород в процессе турбулентного перемешивания селевой массы или ее взаимодействия с руслообразующими породами.

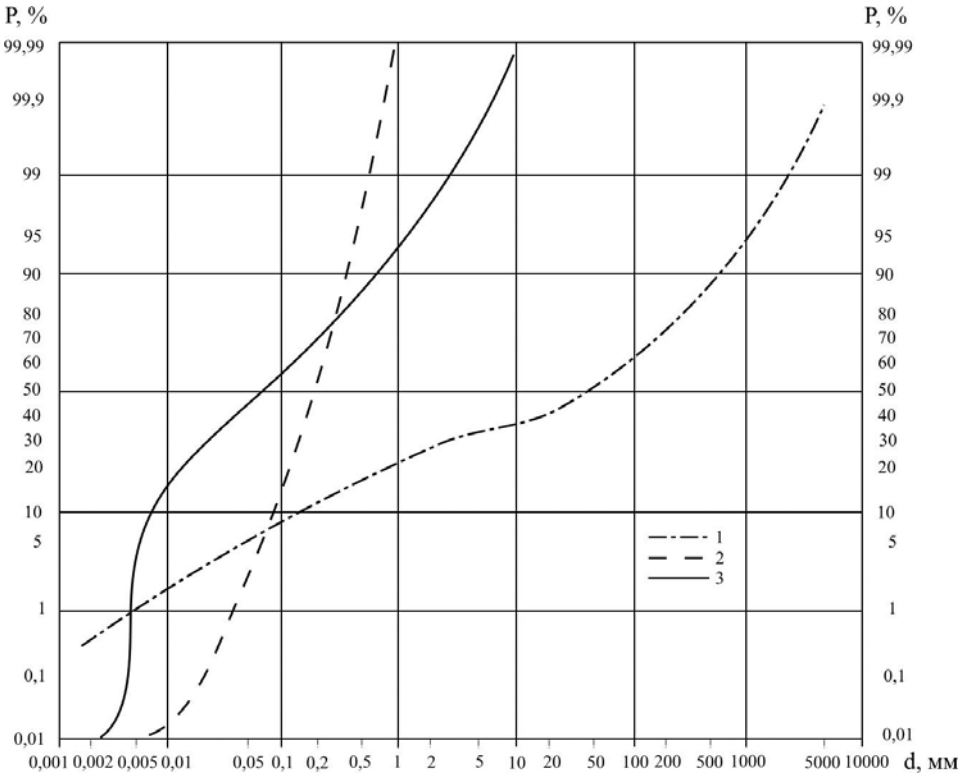


Рисунок 3.1. Интегральные графики гранулометрического состава селеформирующих пород в селевых очагах.
1 – Малоалматинский селевой очаг [90]; *2* – пустыня Жаманкум; *3* – Чуст-Папские адыры

Оценка изменения гранулометрического состава твердого компонента по данным натурных наблюдений – исключительно сложная задача. Известно, что селевому потоку присущ пульсационный характер изменения скорости, расхода и плотности селевой массы. Поэтому при сравнении характеристик гранулометрического состава твердого компонента селевой массы в различных створах нужны убедительные доказательства того, что пробы взяты из одного и того же «объема» потока, а это практически невыполнимо.

Поскольку при больших значениях плотности селевых масс даже относительно небольшое изменение содержания пылеватых и мелкопесчаных фракций может приводить к весьма существенным изменениям вязкопластических свойств селевой массы, решение проблемы расчета трансформации гранулометрических характеристик их твердого компонента во времени и пространстве актуально. Если данные о степени изменения гранулометрического и минералогического составов твердого компонента селевой массы за счет вовлечения в селевой процесс грунтов различного состава мы можем (пусть в первом приближении) получить с помощью разработанных к настоящему времени моделей селеформирования, то этого нельзя сказать о ситуации, когда гранулометрический состав изменяется вслед-

ствие механического дробления и истирания в селевом потоке. Работы, посвященные последней теме, крайне немногочисленны и носят постановочный характер [4, 40, 86, 92–94].

3.2. Свойства и характеристики селевой массы

3.2.1. Упругость селевой массы

Под упругостью понимается свойство тел восстанавливать свою форму и объем после прекращения действия внешних сил. Жидкости обладают упругостью только по отношению к всестороннему сжатию. Сжимаемостью жидкости (воды) называется свойство уменьшения объема под влиянием повышения внешнего давления. Величиной, обратной сжимаемости, является объемная упругость. Хотя селевая масса и обладает упругостью, при расчете характеристик селей это не учитывается. Однако высокая упругость воды и горных пород, а также внутренняя скомпенсированность молекулярного притяжения воды приводят к тому, что при резком изменении скорости крупных фракций твердого компонента селевой массы происходит выброс из потока не только грязевой составляющей, образующей над ним грязевое облако, но и частиц с размерами в несколько десятков и более сантиметров. Так, при ударе фронтальной части селя 1973 г. (р. Киши Алматы) о сквозную плотину в районе турбазы «Горельник» глыба (с размерами около одного метра) была выброшена на высоту в несколько метров и упала на веранду, располагавшуюся более чем в 10 м от берега реки. Камни с размерами до 10 см изрешетили шиферную крышу двухэтажного административного корпуса, находившегося примерно в 50 м от плотины, погибли люди.

3.2.2. Вязкость селевой массы

Вязкость по И. Ньютону – коэффициент пропорциональности между касательным напряжением и градиентом скорости. Ньютоновские жидкости деформируются при приложении бесконечно малых (но не равных нулю!) сил. Селевая масса (при отсутствии пылевато-глинистых частиц в составе ее твердого компонента) представляет собой жидкость, в которой твердые частицы находятся во взвешенном состоянии. При этом их концентрация может изменяться в очень широких пределах. Повышение концентрации твердых частиц увеличивает ее вязкость. Вязкость селевой массы зависит от температуры воды (таблица 3.2) [95].

Таблица 3.2. Динамическая вязкость воды в зависимости от ее температуры

Температура воды, °С	0	10	20	30	40	50
Динамическая вязкость, мПа·с	1,792	1,308	1,003	0,798	0,653	0,547

Для определения вязкости концентрированной суспензии Дж. Хаппель и Г. Бреннер [96] предложили выражение

$$\frac{\eta_s}{\eta_o} = 1 + 5{,}5C\varphi\,, \qquad (3.1)$$

где η_s – вязкость суспензии, (Н·с)/м^2; η_o – вязкость жидкого компонента, (Н·с)/м^2; φ – фактор взаимодействия твердых сферических частиц.

В той же работе приведены некоторые соотношения переменных в уравнении (3.1) (таблица 3.3).

Таблица 3.3. Зависимость относительной вязкости от объемной концентрации твердого компонента

Объемная концентрация твердого компонента	Фактор взаимодействия твердых сферических частиц	Относительная вязкость
0	1,00	1,00
0,05	1,0022	1,281
0,10	1,100	1,605
0,15	1,208	1,997
0,20	1,351	2,486
0,25	1,538	3,115
0,30	1,783	3,942
0,35	2,110	5,062
0,40	2,555	6,621
0,45	3,176	8,861
0,50	4,071	12,20

Из опытов Т. С. Чонга (T. S. Chong) [97] следует, что высококонцентрированная суспензия при малой скорости деформации ведет себя как ньютоновская жидкость, ее вязкость не зависит (при одинаковых концентрациях) от размеров твердых сферических частиц (размер частиц 50–230 мкм). Те же эксперименты позволили получить эмпирическую формулу для определения вязкости суспензии

$$\eta_s = \eta_o \left(1 + \frac{1{,}25C}{1 - \dfrac{C}{0{,}605}} \right). \qquad (3.2)$$

Из этой формулы следует, что вязкость суспензии стремится к бесконечности при объемной концентрации частиц C=60,5 %. Сохранение свойства ньютоновской жидкости у суспензии с большей концентрацией твердого компонента возможно при полидисперсном ее составе.

Наиболее перспективным при разработке методов расчета вязкости концентрированных суспензий, твердый компонент которых представлен различными по размеру частицами, является, судя по всему, использование принципа мультипликативности [4].

Сущность его заключается в последовательном по мере увеличения размера и концентрации частиц в суспензии учете влияния твердых частиц на суммарную вязкость суспензии. Пусть вязкость «исходной» суспензии равна

$$\eta_1 = \eta_o f_1(\Gamma_1, C_1). \tag{3.3}$$

Вязкость селевой массы, образуемой при добавлении к «исходной» суспензии фракций d_1-d_2, будет

$$\eta_2 = \eta_1 f_2(\Gamma_2, C_2, \Gamma_1, C_1),$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots,$$
$$\eta_n = \eta_{n-1} f_n(\Gamma_n, C_n, \Gamma_{n-1}, C_{n-1}),$$

где Γ_i – функция, описывающая гранулометрическую кривую в интервале размеров частиц d_{i-1}-d_i; C_i – объемная концентрация этих частиц; i=1, 2, …, n.

Сложность процессов, протекающих при деформации селевой массы, не позволяет надеяться на возможность в скором будущем теоретического решения обсуждаемой задачи, поэтому вид функций должен выявляться экспериментально.

Результаты исследования зависимости вязкости селевых суспензий от объемной концентрации твердого компонента в случае, когда максимальное отношение размеров частиц в интервале равнялось 10, показали, что эта зависимость при концентрациях C=0,1–0,5 может быть аппроксимирована выражением

$$\eta_s = \eta_o(1 + 2{,}5C)(10C^2 + \exp 11C^2). \tag{3.4}$$

При этом погрешность аппроксимации не превышает 10 %.

При полидисперсном гранулометрическом составе твердого компонента селевой массы расчет ее вязкости осуществляется следующим образом. Исходными данными служат объемная концентрация твердого компонента в селевой массе C, гранулометрический состав селеформирующих пород, динамическая вязкость воды (при заданной ее температуре). Динамическая вязкость селевой массы определяется по формуле

$$\eta_{см} = K^{n-1}\eta_o \prod_{i=1}^{n} \frac{\eta_i}{\eta_{i-1}}, \tag{3.5}$$

где K – коэффициент, учитывающий взаимное влияние частиц смежных интервалов; n – количество десятичных интервалов гранулометрического состава (гранулометрический состав разбит на интервалы таким образом, что минимальный и максимальный размеры частиц каждого интервала отличаются друг от друга в десять раз); $\frac{\eta_i}{\eta_{i-1}}$ – относительная вязкость селевой массы, содержащей частицы размером не более частиц i-го интервала; K=1,34^C (C берется в долях единицы); вязкость воды принимается в соответствии с заданной температурой воды.

Концентрация частиц i-го интервала в селевой массе, включающей воду и все частицы i-й фракции, определяется по формуле

$$C_i = \frac{p_i}{p_{\le i} + \frac{1}{C} - 1}, \tag{3.6}$$

где p_i – содержание частиц i-го интервала в исследуемом гранулометрическом составе, доли ед.; $p_{\le i}$ – содержание частиц i-х интервалов, доли ед.

Если $C_i \le 0{,}5$, то относительная вязкость рассчитывается по формуле

$$\frac{\eta_i}{\eta_{i-1}} = \left(1 + 2{,}5C_i\right)\left(10C_i^2 + \exp 11C_i^2\right), \tag{3.7}$$

в противном случае – по формуле

$$\frac{\eta_i}{\eta_{i-1}} = \left(1 + 2{,}5C_i\right)\left(10C_i^2 + \exp 11C_i^2\right)\exp\left(20C_i - 10\right). \tag{3.8}$$

На рисунке 3.2 приведены расчетные данные зависимости вязкости селевой массы, характерной для Иле Алатау, от ее концентрации. В основу расчета был положен принцип мультипликативности, в соответствии с которым гранулометрическая кривая селеформирующих пород была разбита на шесть интервалов: 0–0,1; 0,1–1; 1–10; 10–100; 100–1000; 1000–10 000 мм.

Для уменьшения погрешности определения вязкости селевой массы целесообразно сочетать измерения с расчетом. В частности, вязкость селевой массы, включающей в себя воду и частицы с размерами менее 0,1 мм, следует определять экспериментально с помощью вискозиметров, имеющих горизонтальную ось вращения. В таких вискозиметрах не нужно заботиться о перемешивании селевой массы в целях взвешивания частиц.

Важнейшим результатом исследования реологических свойств селевой массы, выполненных в Казахском научно-исследовательском гидрометеорологическом институте, является вывод о том, что вязкость селевой массы, твердый компонент которой представлен полидисперсными частицами,

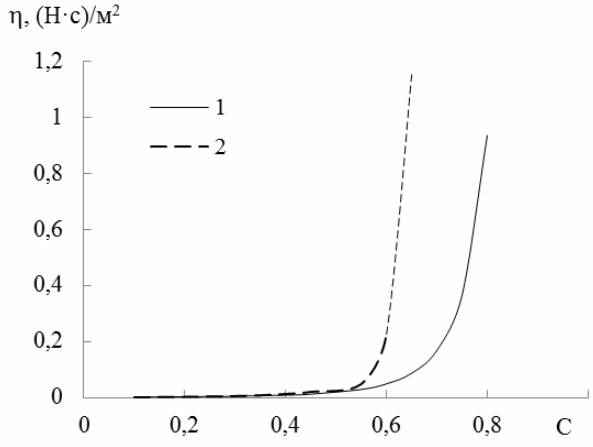


Рисунок 3.2. Зависимость вязкости селевой массы от объемной концентрации твердых частиц. *1* – гранулометрический состав грунтов морен Иле Алатау; *2* – шарообразные частицы одинакового размера

может иметь относительно невысокие значения при объемных концентрациях твердого компонента, достигающих 0,8–0,85. Полученные данные в корне противоречат исходным предпосылкам, послужившим М. А. Великанову, М. А. Мосткову, И. И. Херхеулидзе и другим ведущим исследователям селей 50–60-х годов XX столетия основанием для утверждения о затухании и прекращении процессов турбулентного взвешивания твердого компонента при его концентрации в селевых массах, превышающей 0,35–0,53 [98–100]. Показано, что решающая роль в формировании вязкости принадлежит не только концентрации твердого компонента и минералогическому составу его пылевато-глинистых фракций, на что указывало большинство исследователей селей, но и гранулометрическому составу твердого компонента селевой массы. Расширение диапазона крупностей твердых частиц, представляющих селеформирующие породы, не только не увеличивает вязкость селевой массы, но, наоборот, приводит к ее уменьшению.

Следовательно, при минералогическом и гранулометрическом составах селеформирующих пород, типичных для большинства селеопасных районов СССР, турбулентный характер взвешивания твердого компонента сохраняется вплоть до плотности селевой массы, при которой вязкопластические свойства становятся значимыми. Последние с дальнейшим увеличением плотности селевой массы принимают на себя роль фактора, ответственного за поддержание твердого компонента во взвешенном состоянии.

3.2.3. Пластичность селевой массы

Пластичностью называется свойство тел необратимо, без разрыва сплошности, деформироваться под действием внешних сил или внутренних напряжений.

Селевая масса приобретает свойство твердых тел в результате возникновения структурных связей, обусловленных присутствием в них глинистых фракций и гумуса. Эти связи имеют электрическую природу и проявляются в том, что при малых напряжениях деформация тел, обладающих вязкопластическими свойствами, носит упругий характер. При превышении предельного напряжения сдвига начинается разрушение структуры, что приводит к необратимым деформациям тел. В процессе деформации происходят непрерывное разрушение и восстановление структурных связей. Число действующих связей в пластических средах зависит, в частности, от скорости их деформации и имеет максимальное значение при течении с суммарно не разрушенной структурой, т.е. при сохранении статистически постоянного числа действующих связей.

Вязкопластические свойства селевой массы характеризуют величиной напряжения сдвига. В технической литературе широко распространен термин «статическое напряжение сдвига». Быть может, при изучении сред, в которых необратимые деформации нарастают лавинообразно, практически сразу после достижения упругими деформациями критических значений, этот термин приемлем. Примером среды, в которой упругие деформации лавинообразно переходят в пластические, может служить глинистый

раствор. Однако в ситуациях, когда среда содержит твердые частицы, размеры которых соизмеримы с размерами деформируемых объемов, более реально отражает процессы, происходящие в деформируемых средах, термин «предельное напряжение сдвига». Если деформация глинистых растворов происходит в тонких слоях с выделением воды из дисперсионной среды (явление синерезиса), то при деформации сред, содержащих макроскопические частицы, соизмеримые с деформируемыми объемами, при увеличении содержания этих частиц толщина деформируемого слоя растет и может захватить весь объем образца. Предельное напряжение сдвига соответствует моменту, когда в формировании сопротивления сдвигу участвует максимально возможное (в конкретной ситуации) число твердых частиц.

Приоритет в понимании важности учета вязкопластических свойств селевой массы при объяснении природы селевых явлений, расчете характеристик селей и взаимодействии селей с инженерными сооружениями принадлежит С. М. Флейшману и грузинским исследователям. Так, Г. М. Беручашвили [41] предложил зависимость, устанавливающую связь предельного напряжения сдвига селевой массы с величиной предельного напряжения сдвига жидкого (грязевого) компонента (смесь воды и твердых частиц с размером менее 1 мм) и объемной концентрацией жидкого компонента в селевой массе. В. И. Тевзадзе, исследовавшим реологические свойства селевой массы с помощью пластовискозиметра ПВР-2, получено выражение для предельного напряжения сдвига, в котором установлена связь между предельным напряжением сдвига, средним диаметром фракций более 1 мм, весовым содержанием всех фракций твердого компонента селевой массы и весовым содержанием фракций более 1 мм. Уравнение, описывающее зависимость предельного напряжения сдвига от весового содержания глинистых фракций (к таковым были отнесены частицы с размерами менее 0,001 мм) и весового содержания воды в селевой массе, получено Д. К. Пруидзе [41].

К сожалению, попытки использовать упомянутые зависимости для определения вязкопластических свойств селевой массы в районах, отличных по геологическому строению от бассейна р. Дуруджи, не увенчались успехом. Во-первых, эти методики не учитывали влияние на вязкопластические свойства селевой массы минерального состава пылевато-глинистых фракций и, во-вторых, было установлено, что большую роль в формировании вязкопластических свойств селевой массы играет гранулометрический состав их твердого компонента.

Это обстоятельство, а также главенствующая роль вязкопластических свойств в большинстве селевых процессов, представляющих практический интерес, предопределили характер и объемы НИР, выполненных в КазНИГМИ в 1980–1985 гг. по изучению вязкопластических свойств селевой массы.

В процессе исследования вязкопластических свойств селевой массы выявилась необходимость в учете минералогического и гранулометрического составов их твердого компонента (рисунок 3.3). Определение минералогического состава пылевато-глинистых фракций и их количества явля-

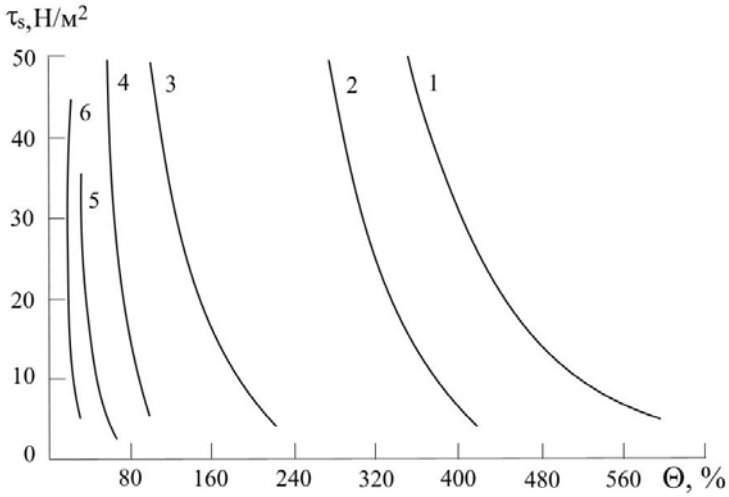


Рисунок 3.3. Зависимость предельного напряжения сдвига селевой суспензии от весовой влажности для различного минералогического состава их твердого компонента.
1 – монтмориллонит; *2* – 50 % монтмориллонит + 50 % каолин; *3* – каолин;
4 – лёссы Иле Алатау; *5* – мелкозем селевых отложений в бассейне р. Дуруджи;
6 – мелкозем селевых отложений в бассейне р. Улькен Алматы

ется сложной операцией, не менее сложной представляется и разработка методов использования этих данных при расчете предельного напряжения сдвига. В то же время экспериментальное определение зависимости предельного напряжения сдвига суспензии (смеси воды и твердых частиц, размер которых не превышает 1 мм) от ее влажности не представляет каких-либо трудностей и может выполняться специалистами средней квалификации.

Очевидно, что суммарная погрешность моделирования вязкопластических свойств суспензий, включающая погрешность количественного определения минералогического и гранулометрического составов пылевато-глинистых фракций, будет намного превосходить погрешность установления вязкопластических свойств суспензий с помощью устройств, подобных прибору СНС-2. Относительная простота получения данных о вязкопластических свойствах суспензий делает привлекательной идею о представлении селевой массы системой, состоящей из дисперсной среды (суспензия) и дисперсной фазы (частиц, размеры которых превышают 1 мм). Именно такой подход к идеализации селевой массы в сочетании с принципом мультипликативности и использовался в КазНИГМИ при разработке модели, описывающей вязкопластические свойства селевой массы [41].

Экспериментальное исследование предельного напряжения сдвига селевой массы показало, что основными факторами, определяющими ее вязкопластические свойства, являются концентрация вещества, его минералогический и гранулометрический составы, форма и размер частиц. Л. Н. Гавришина установила [101], что для монодисперсной селевой массы зависимость предельного напряжения сдвига $\tau_{см}$ от концентрации частиц C и их размеров d имеет вид

$$\frac{\tau_{см}}{\tau_{д.ср}} = \exp\left(0{,}4C^{0{,}75}\right) + 54{,}87\frac{C^{3{,}15}}{d^{0{,}33}}\left[1+\left(\frac{d}{\Delta R}\right)^{0{,}33}\right], \qquad (3.9)$$

где $\tau_{д.ср}$ – предельное напряжение сдвига дисперсионной среды, Н/м^2; ΔR – характерный размер области, содержащей селевую массу (например, ширина зазора между цилиндрами в СНС-2), м. Приведенная зависимость показана на рисунке 3.4.

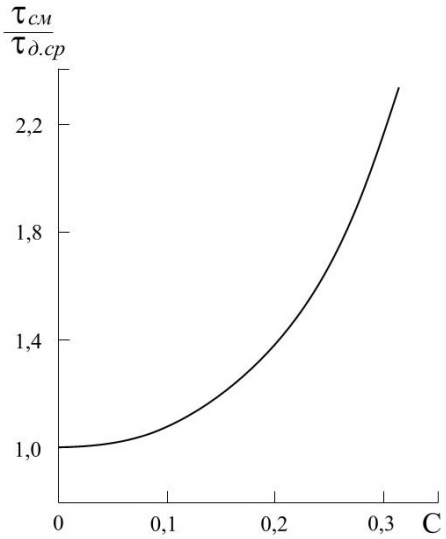


Рисунок 3.4. Зависимость относительного значения предельного напряжения сдвига от концентрации для однородных частиц (по Л. Н. Гавришиной). d=0,005 м; ΔR=0,1 м

Влияние неоднородности размеров частиц дисперсной фазы показано на рисунке 3.5.

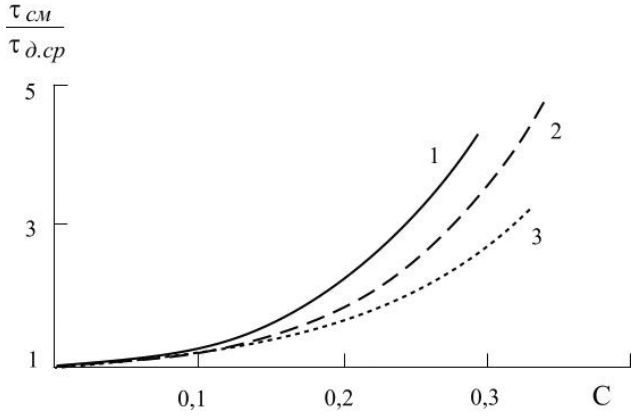


Рисунок 3.5. Влияние неоднородности размеров частиц дисперсной фазы на относительное значение предельного напряжения сдвига (по Л. Н. Гавришиной). *1* – монодисперсная селевая масса (d=0,17 мм); *2* – 22 % частиц d=0,17 мм и 78 % d=1,5 мм; *3* – 12 % частиц d=0,17 мм и 88 % d=1,5 мм

В случае полидисперсного состава твердого компонента селевой массы при моделировании предельного напряжения сдвига используется принцип мультипликативности, позволяющий использовать формулу

$$\tau_{см} = \tau_s \prod_{i=1}^{n} \tau_i \,, \tag{3.10}$$

где τ_s – предельное напряжение сдвига суспензии (смесь жидкого компонента и частиц с размерами менее 1 мм), Н/м^2; n – количество групп, на которые разбивается гранулометрический состав селеформирующих пород, начиная с частиц крупнее 1 мм; τ_i – относительная величина предельного напряжения сдвига селевой массы, включающей i-ю фракцию, по отношению к дисперсионной среде, Н/м^2.

Величина τ_i является функцией содержания i-й и (i-1)-й фракций в селевой массе и средних размеров их частиц.

$$\tau_i = F\left(C_i, d_{cp_i}\right) I\left(C_i\right) Z\left(C_i, C_{i-1}, \psi_{i,i-1}\right), \tag{3.11}$$

где d_{cpi} – средний размер частиц i-й фракции, м; F, I, Z – функции, полученные при обработке экспериментальных данных.

Исходными данными для расчета предельного напряжения сдвига селевой массы служат гранулометрический состав селеформирующих пород, весовая влажность селевой суспензии и значение предельного напряжения сдвига селевой суспензии при этой влажности.

Гранулометрический состав разбивается на группы так, чтобы диаметры наименьших и наибольших частиц в группе отличались не более чем в 10 раз, условная концентрация частиц группы, определяемая по формуле (3.12), была не более 0,30, а отношение средневзвешенных размеров частиц соседних групп $\psi_{i,\,i-1}$ было не более 0,5.

Условная концентрация частиц i-й группы определяется по формуле

$$C_i = \frac{\dfrac{m_i\left(1-C_в\right)}{\rho_T}}{\dfrac{C_в}{\rho_o} + \dfrac{m_i'\left(1-C_в\right)}{\rho_T}}, \tag{3.12}$$

где m_i – массовое содержание частиц только i-й группы, доли ед.; m_i' – массовое содержание всех частиц до i-й группы включительно, доли ед.; $C_в$ – концентрация воды в селевой массе, доли ед.; ρ_o и ρ_T – соответственно плотность воды и твердого компонента, кг/м^3.

Концентрация воды в селевой массе определяется по формуле

$$C_в = \frac{C_{в.s} m_{\le 1}}{1 - C_{в.s} m_{>1}}, \tag{3.13}$$

где $C_{в.s}$ – содержание воды в селевой суспензии, доли ед.; $m_{\le 1}$, $m_{>1}$, – соответственно массовое содержание частиц размером менее 1 мм и более 1 мм, доли ед.

Средневзвешенный размер частиц i-й группы находится по формуле

$$\overline{d}_i = \frac{\sum_{j=1}^{k} m_j d_j}{\sum_{j=1}^{k} m_j}, \qquad (3.14)$$

где m_j – массовое содержание частиц j-й фракции; d_j – характерный размер частиц j-й фракции, определяемый как среднее арифметическое наибольшего и наименьшего размеров частиц j-й фракции, мм; k – число фракций, включенных в i-ю группу.

Значение функции $F\left(O_i, \overline{d}_i\right)$ рассчитывается по формуле

$$F\left(C_i, \overline{d}_i\right) = \exp\left(0{,}4C_i^{0,75}\right) + 54{,}87\frac{C_i^{3,15}}{\overline{d}_i^{\,0,33}}\left[1 + \left(\frac{\overline{d}_i}{d_{\max}}\right)^{0,33}\right], \qquad (3.15)$$

где d_{max} – максимальный размер частиц рассматриваемого гранулометрического состава селеформирующих пород, мм.

Значение функции $I(C_i)$ определяется по формуле

$$I\left(C_i\right) = 1 - 0{,}35C_i^{0,75}. \qquad (3.16)$$

Значение функции $Z\left(C_i, C_{i-1}, \psi_{i,i-1}\right)$ находится по формуле

$$Z\left(C_i, C_{i-1}, \psi_{i,\,i-1}\right) = 1 + 76{,}70\psi_{i,i-1}^{0,39} C_i C_{i-1}^{1,83} \exp\left(1{,}21C_i\right), \qquad (3.17)$$

где $\psi_{i,i-1} = \dfrac{\overline{d}_{i-1}}{\overline{d}_i}$.

Максимальную относительную погрешность расчетного значения предельного напряжения сдвига селевой массы можно оценить по формуле

$$E_{\tau_{см}}^2 = E_{\tau_s}^2 + 392n, \qquad (3.18)$$

где E_{τ_s} – максимальная относительная погрешность определения значения τ_s, %; n – количество групп, на которые разбит гранулометрический состав.

Оценка неопределенности рассчитанного предельного напряжения сдвига селевой массы, выполненная Л. Н. Гавришиной, показала, что максимальная неопределенность функции F составляет 16 %, функции L – 10 %, функции Z – 6 %. Тогда при аппроксимации гранулометрического состава твердого компонента двумя группами максимальная неопределенность рассчитанных значений предельного напряжения сдвига селевой массы составит 28 %, а при аппроксимации тремя группами – 34 %.

Расчеты показывают, что результирующее предельное напряжение сдвига селевой массы определяется в основном величиной предельного напряжения сдвига селевой суспензии. Определять ее следует непосредственным измерением вследствие существенного влияния минералогического состава пылевато-глинистых фракций на реологические свойства суспензий.

Представление об этом влиянии можно получить из сравнения значений предельного напряжения сдвига селевой суспензии для различных районов СССР (таблица 3.4).

Таблица 3.4. Влажность суспензии для фиксированных значений предельного напряжения сдвига, %

Литологическая характеристика или место взятия пробы	Предельное напряжение сдвига, Н/м^2					
	10	20	40	60	80	100
Каолин	230	210	170	153	140	130
Монтмориллонит	520	450	375	340	307	275
Лёсс, Иле Алатау	85	75	62	56	52	50
Кавказ (бассейн р. Дуруджи)	57	51	44	40	38	37
Киргизский хребет	43	40	37,5	36,3	35,5	35
Алайский хребет	54	49	46	44,5	43,5	42,8
Алайский хребет	41,5	40	38	36,5	35	34,3
Заалайский хребет (район пика Ленина)	41,5	40	37,5	36,3	34,8	34,2
Жетысу Алатау (бассейн р. Сарыкан)	46,5	32,5	29	27	25,5	24,5
Иле Алатау (восточная оконечность)	38,5	36,3	33,7	32	31	30,3
Иле Алатау (бассейн р. Есик)	36	33	31	29,5	28,5	27,7
Иле Алатау (бассейн р. Улькен Алматы)	37	32,5	28	26	25	24,3
Иле Алатау (бассейн р. Турген)	39	34	32	31	28,7	27,9
Кунгей Алатау	43	39	35,5	34	33	32,2
Терскей Алатау	40	36	33,5	31,7	30,2	29,4
Адыры Западного Предыссыкулья	72,5	69	64,5	61	59	57,5
Лёсс, район г. Каракол	66	60	52,5	48	46	44,5
Крым (р. Кипарисная)	59	54	49	46,5	44,5	43

Нетрудно видеть, что при одинаковом весовом содержании воды в суспензиях значения предельного напряжения сдвига могут отличаться более чем на порядок.

Экспериментальное исследование процессов сдвига на границах, имеющих различную степень шероховатости, позволило сделать вывод, имеющий большое практическое значение. Оказалось, что в формировании предельного напряжения сдвига принимают участие только частицы, размеры которых меньше или равны размерам выступов шероховатости поверхности, на контакте с которой происходит сдвиг.

На рисунке 3.6 показаны зависимости предельного напряжения сдвига селевой массы, твердый компонент которой был представлен фракциями 1–2, 2–3, 3–5, 5–7 и 7–10 мм, взятыми в равных пропорциях от концентрации твердого компонента.

Предельные напряжения сдвига могут измеряться с помощью прибора СНС-2. Селевая суспензия изготовляется из проб мелкозема, при этом недопустима потеря пылевато-глинистых частиц, поскольку они существенно влияют на результаты измерений. Подробная методика измерения предельного напряжения сдвига приведена в диссертации Л. Н. Гавришиной [101]. Отметим только некоторые моменты, которыми необходимо руководствоваться при экспериментальном определении упомянутой характеристики:

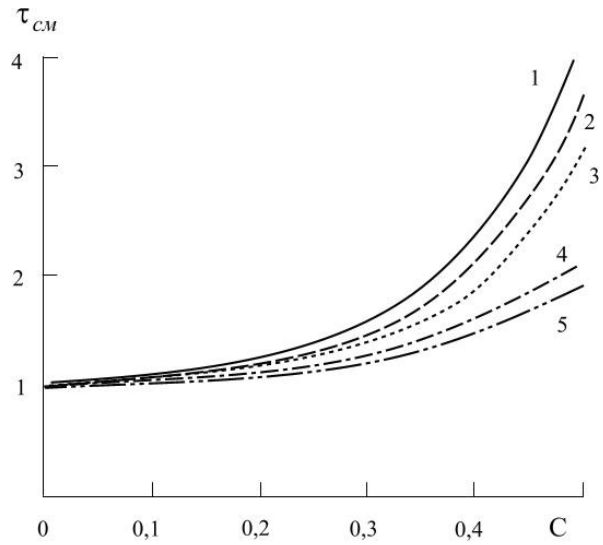


Рисунок 3.6. Влияние шероховатости на значение предельного напряжения сдвига (по Л. Н. Гавришиной).

1 – d=0,17 мм, $\frac{d}{\Delta R}$=0,035; *2* – d=0,75 мм, $\frac{d}{\Delta R}$=0,15; *3* – d=1,5 мм, $\frac{d}{\Delta R}$=0,3; *4* – d=4 мм, $\frac{d}{\Delta R}$=0,1; *5* – d=8,5 мм, $\frac{d}{\Delta R}$=0,21

1. В процессе приготовления глинистых растворов необходимо следить за полным разрушением коагуляционных структур.

2. Отношение диаметра максимальных частиц в суспензии к величине межцилиндрового зазора должно быть не более 0,1.

3. Размеры шероховатости цилиндров должны превышать максимальные размеры частиц суспензии.

4. После заливки суспензии не следует, как это рекомендуется в общепринятой методике измерения статического напряжения сдвига глинистых растворов, перемешивать ее вращением цилиндров друг относительно друга. Это приводит к неравномерному распределению концентрации твердых частиц в деформируемом объеме и в конечном счете к занижению предельного напряжения сдвига.

3.2.4. Предельная плотность селевой массы

Плотность селевой массы может быть представлена суммой

$$\rho_{см} = \sum_{i=1}^{n} \rho_i C_i \,, \tag{3.19}$$

где ρ_i и C_i – плотность и объемная концентрация элементарных объемов селевой массы в ее единичном объеме.

Дифференциация твердого компонента по плотности может быть обусловлена как различием минералогического состава твердых частиц, так и наличием в рыхлообломочной породе пор, полостей, трещиноватости и т.д.

В простейшей ситуации, когда селевая масса представлена твердыми частицами, имеющими одинаковую плотность, и водой, формула приобретает вид

$$\rho_{см} = \rho_T C + \rho_o (1 - C) . \qquad (3.20)$$

Эта формула широко используется в практике расчета характеристик селей.

Пожалуй, ни одна из проблем селеведения не вызывала столько дискуссий, как проблема максимального соотношения твердого и жидкого компонентов в селевых потоках. Обсуждаемая проблема имеет и большое практическое значение, поскольку неверная оценка предельной плотности селевой массы приводит к недооценке характеристик селей. Изменение плотности селевой массы с 1825 до 2500 кг/м^3 в условиях Иле Алатау способствует, как минимум, пятикратному увеличению объема и расхода селей, изменению режима движения селя от турбулентного к квазиламинарному и т.д.

В той или иной мере решением вопросов, связанных с нахождением предельной концентрации твердого компонента в селевой массе, занимались М. С. Гагошидзе, М. А. Великанов, И. В. Егиазаров, Д. Л. Соколовский, С. М. Флейшман, И. В. Боголюбова, И. Штини, Р. Багнольд, Т. Такахаши и другие исследователи. Критический анализ состояния проблемы содержится в работах И. И. Херхеулидзе [102], Ю. Б. Виноградова [103], Т. С. Степановой [104].

Особенностью этих дискуссий, продолжающихся уже более полувека, является различный подход ее участников к решению проблемы. Так, М. А. Великанов, И. В. Егиазаров, М. А. Мостков и др. исходили из предельной транспортирующей способности потоков. И. Г. Есьман и В. Н. Гончаров наибольшее содержание твердого компонента в селях определяли величиной «порозности» аллювиальных грунтов. Выводы Р. Багнольда и Т. Такахаши базировались на результатах изучения динамики дисперсоидов, состоящих из жидкости и однородных упругих шаров. И. И. Херхеулидзе, Ю. Б. Виноградов и Т. С. Степанова исходили из максимально возможной упаковки твердого компонента в условиях сохранения у селевой суспензии текучести. Привлекались и данные определения плотности селевой массы по следам прохождения селей.

Постановка проблемы расчета предельно возможной концентрации твердого компонента в селевых массах становится строже, если ее сформулировать в виде двух самостоятельных задач:

1. Определить предельно возможную концентрацию твердого компонента (при заданных его гранулометрическом и минералогическом составах) в селевой массе.

2. Установить предельно возможную концентрацию твердого компонента в селевой массе, образующегося в конкретных геологических, гидрологических и геоморфологических условиях.

При решении первой задачи возможны два варианта: в первом варианте, характеризующимся значительным содержанием пылевато-глинистых

фракций, увеличение концентрации твердого компонента до предельно возможного значения приводит к потере селевой массой текучести во всем ее объеме. При напряжениях, превышающих пределы прочности селевой массы, она разрушается с нарушением сплошности. Движение подобных масс классифицируется как оползни и обвалы. При концентрациях, меньших предельных значений, сопротивление деформации селевых масс носит вязкопластический характер. Такие сели при определенных условиях могут перемещаться на уклонах менее 1°. Предельную плотность нетрудно подсчитать, если известна плотность суспензии (смесь воды и твердых частиц, размеры которых не превышают 1 мм) на пределе текучести (определяется экспериментально), доля частиц с размером менее 1 мм в полном гранулометрическом составе селеформирующих пород и их средняя плотность. Для условий Иле Алатау предельная плотность селевой массы, формирующейся из рыхлообломочных пород древних морен, близка к 2500 кг/м^3 (рисунок 3.7).

На протяжении многих десятилетий считалось, что плотность селевой массы селей Иле Алатау не превышает 2200 кг/м^3. Объясняется это отсутствием (на тот период времени) данных о непосредственных измерениях плотности селевой массы, отсутствием данных о полном гранулометричес-

Рисунок 3.7. Селевой очаг в бассейне р. Кумбель

ком составе селеформирующих пород, ошибочными теоретическими представлениями о механизмах формирования селей при взаимодействии водных потоков с рыхлообломочными породами.

Второй вариант – ситуация, при которой мелкозема, образующего суспензию на пределе текучести, не хватает для заполнения пор, образуемых твердым скелетом из соприкасающихся обломков пород, имеющих относительно большие размеры. Максимальная плотность селевой массы при этом определяется соотношением твердого и жидкого компонентов в условиях полного заполнения пор водой. Перемещение таких масс в условиях дефицита воды классифицируется как движение частично увлажненных осыпей. В силу преобладания силы трения, имеющей кулоновскую природу, движение масс становится возможным лишь на значительных уклонах вне зависимости от глубины потока.

3.2.5. Распад селевой массы

Распад селевой массы – закономерное и неизбежное явление, завершающее селевой процесс. Под распадом селевой массы понимаются такие сложные физико-механические процессы, как осаждение крупных частиц; излияние из их порового пространства суспензии; истечение, фильтрация и испарение воды из остановившейся селевой массы, что приводит к ее трансформации.

Действие силы тяжести на твердый компонент селевой массы проявляется в оседании частиц. Скорость оседания частиц является, в частности, функцией их плотности, формы и размера. Если взвешивание частиц селевой массы превалирует над оседанием частиц, может происходить увеличение концентрации твердого компонента в селевом потоке, в противном случае – ее уменьшение.

В зависимости от условий протекания распад селевой массы может быть полным или частичным. Полный распад селевой массы можно наблюдать при ее остановке. Наиболее характерными ситуациями при этом являются остановка селевой массы большой плотности (абсолютная ее величина является функцией гранулометрического и минералогического составов твердого компонента селевой массы и может изменяться в очень широких пределах) на участках русел, имеющих относительно малые уклоны, а также остановка селевой массы перед глухими плотинами.

В первом случае (при небольшой глубине селевого потока) распад селевой массы происходит, как правило, без дифференциации частиц по крупности. Твердые частицы, опускаясь, формируют твердый скелет, опирающийся на дно, жидкий компонент может вытесняться вверх и истекать через боковые поверхности остановившейся селевой массы.

Качественно иной характер распад селевой массы носит при остановке большого объема селевой массы перед глухой плотиной. Вследствие различной гидравлической крупности частиц может происходить их существенная дифференциация: размер частиц, образующих твердый скелет, уменьшается от нижних слоев к верхним. Крупность отложившихся частиц может изменяться и по горизонтали.

При частичном распаде селевой массы в русле осаждаются те частицы, гидравлическая крупность которых превышает величину вертикальных пульсаций скорости в селевом потоке. Фактором, способствующим частичному распаду, является неблагоприятное соотношение морфометрических характеристик русла, расхода и плотности селевой массы.

До последнего времени распаду селевой массы не уделялось должного внимания, что приводило, как показывает история селеведения, к появлению теорий селеформирования, не имеющих ничего общего с реальной действительностью.

Рассмотрим более подробно процесс распада селевой массы. Известно [105], что на тело, погруженное в «тяжелую» жидкость (т.е. жидкость, находящуюся под действием силы тяжести), действует архимедова сила, стремящаяся вытолкнуть его из жидкости и равная по величине весу вытесненной жидкости

$$F_{apx} = -\int g\rho_o dW\,, \tag{3.21}$$

где g, ρ_o, W – соответственно ускорение свободного падения, плотность воды и объем тела.

Весьма важным для понимания процесса распада селевой массы является то обстоятельство, что архимедова сила возникает всегда, когда тело находится в переменном поле давлений. Если тело находится в жидкости и его вес превышает архимедову силу, тело будет двигаться в направлении суммарного вектора сил. Скорость движения тела зависит от величины действующей силы, размера и формы тела и в определенном интервале скоростей от вязкости жидкости.

Г. Стоксом решена задача обтекания шара потоком жидкости, имеющим на бесконечности постоянную по направлению и величине скорость. Полное сопротивление движению шара, обусловленное на одну треть разностью давлений и две трети силой трения, может быть найдено по формуле Стокса, справедливой в области чисел Рейнольдса Re<1.

По мере возрастания числа Рейнольдса (1<Re<100), когда пренебречь силой вязкости еще нельзя, аналитическое описание процесса обтекания шара жидкостью сопряжено со значительными трудностями. Сведения об этом явлении получены в основном путем экспериментальных наблюдений.

Различие формы естественных частиц и шара при равном их объеме приводит к тому, что сопротивление частиц (для ламинарного режима падения) примерно на одну треть больше сопротивления шара.

В. В. Романовским [106] предложен критерий формы частицы F, определяемый из выражения

$$F = \frac{d^2}{ab}\,, \tag{3.22}$$

где $d = \sqrt[3]{\frac{6W}{\pi}}$ – диаметр равновеликого шара, W – объем шара; a и b – линейные размеры частиц во взаимно перпендикулярных направлениях (длина и ширина).

При F<0,6

$$d = \frac{a+b+c}{3}, \tag{3.23}$$

где a, b, c – линейные размеры частицы.

Скорость осаждения частицы в режиме свободного падения (для турбулентного режима падения) определяется по формуле

$$\omega = (2{,}4F - 0{,}7)\sqrt{\frac{\rho_T - \rho}{\rho} gd}, \tag{3.24}$$

где ρ – плотность среды, вмещающей частицу, кг/м^3.

При отсутствии данных о форме частицы скорость ее осаждения находится как

$$\omega = 1{,}22\sqrt{\frac{\rho_T - \rho}{\rho} gd}. \tag{3.25}$$

Критический анализ исследований гидравлической крупности частиц, выполненных в СССР и за рубежом, приведен в [107]. Данные, иллюстрирующие падение одиночных твердых частиц в жидкости, представляют интерес в двух селевых ситуациях: при очень малых концентрациях твердого компонента селевой массы, когда падение ансамбля частиц не оказывает практического влияния на движение отдельно взятой частицы, и при расчете скорости оседания наиболее крупных частиц в плотной селевой массе.

Вопросам определения характеристик стесненного падения частиц, т.е. падения их в условиях взаимного влияния, в последние десятилетия уделяется большое внимание, прежде всего в связи с использованием в различных технологиях эффектов псевдоожижения.

В. Н. Гончаровым [108] на основе экспериментальных данных Д. М. Минца и С. А. Шуберта [109] получены следующие формулы для скорости стесненного падения:

а) для частиц с диаметром более 1,5 мм (турбулентный режим)

$$\frac{\omega_{cm}}{\omega} = 1 - 1{,}42C; \tag{3.26}$$

б) для тех же частиц (ламинарный режим)

$$\frac{\omega_{cm}}{\omega} = 1 - 2{,}47C, \tag{3.27}$$

где ω_{cm} – скорость стесненного падения частиц, м/с; C≤0,3; форма частиц естественная; удельный вес частиц равен 2650 кг/м^3.

Обстоятельный критический анализ стесненного падения частиц дан в работе [96]. В ней, в частности, приведено соотношение, принадлежащее Моду и Уитмору:

$$\frac{\omega_{cm}}{\omega} = (1 - C)^{\beta}, \tag{3.28}$$

где β – функция формы твердых частиц, распределения размеров и числа Рейнольдса.

По их данным, для шаров с одинаковым размером и плотностью в ползучем течении β=5, для частиц неправильной формы в ползучем течении β=7–10, для шаров в турбулентном потоке β=2–4.

Давление в придонной области, обусловленное равномерным падением частиц в жидкости, может быть найдено из формулы

$$P = gH\left[\rho_T C - \rho_o\left(1 - C\right)\right]. \tag{3.29}$$

Следовательно, плотность селевой массы равна

$$\rho_{см} = \rho_T C + \rho_o\left(1 - C\right). \tag{3.30}$$

Избыточное давление в придонной области

$$\Delta P = P - P_o, \tag{3.31}$$

где P_o – давление столба жидкости высотой H.

Избыточное давление обусловлено силами, возникающими при обтекании движущихся частиц жидкостью и фильтрации ее через решетку, состоящую из движущихся частиц. Жидкость, проходящая через слой взвешенных частиц, кроме статического давления обладает еще и динамическим. Для крупных тел, размер которых значительно больше размеров частиц, образующих для первых «тяжелую» жидкость, динамическое давление в жидкости мало по сравнению с подъемной силой, вызванной перепадом статического давления. С уменьшением размеров тела, падающего в суспензии, относительное влияние динамического давления может превзойти влияние статического давления. В результате этого в одной и той же суспензии тела одинаковой плотности, но разного размера могут перемещаться различно: крупные тела будут тонуть, в то время как самые мелкие всплывать.

Выражение (3.31) справедливо и в случае, когда гидравлическая крупность частиц различна, важно лишь, чтобы скорость их падения была равномерной. Однако при полидисперсном составе твердого компонента уравнение (3.31) не может быть использовано для определения архимедовой силы, действующей на произвольную частицу двухкомпонентной селевой массы.

Рассмотрим ситуацию, которая имеет место при стесненном падении в жидкости частиц с гидравлической крупностью ω_1 и ω_2, причем $\omega_2 > \omega_1$ (рисунок 3.8). Нетрудно видеть, что крупные частицы находятся в поле давлений, образованном суперпозицией поля давления собственно жидкости и локальных полей, обусловленных падением частиц с крупностью ω_1. Если концентрация частиц с крупностью ω_1 высока, а частиц ω_2 настолько мала, что их взаимным влиянием допустимо пренебречь, то поле давлений в окрестности крупной частицы можно считать квазистатическим. Поэтому архимедова сила, действующая на частицу с крупностью ω_2, может быть найдена из выражения

$$F_{арх\,\omega 2} = gW_{\omega 2}\left[\rho_T C_{\omega_1} + \rho_o\left(1 - C_{\omega_1}\right)\right], \tag{3.32}$$

где W_{ω_2} – объем частицы с крупностью ω_2; C_{ω_1} – концентрация частиц с крупностью ω_1 в селевой массе, состоящей из воды и частиц с крупностью ω_1.

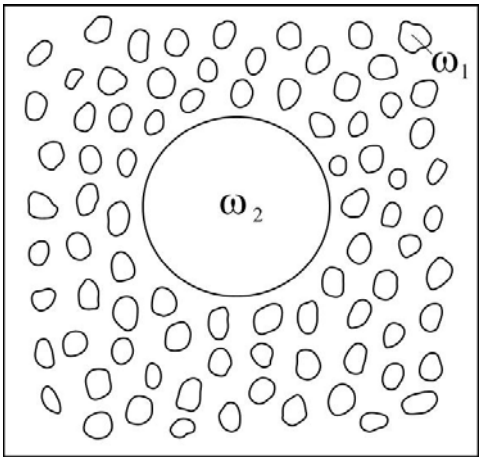


Рисунок 3.8. Крупная частица в поле давления мелких частиц

Величина ω_2 зависит от формы и размера частицы, концентрации этих частиц (степени стесненности падения), вязкости жидкости и частиц с крупностью ω_1, разности объемного веса крупных частиц и жидкости с мелкими частицами.

Иначе проявляется действие крупных частиц на мелкие. В результате течений, возникающих в окрестности крупной частицы вследствие ее движения, на малые частицы действуют силы, носящие переменный характер. Поэтому поведение малой частицы, находящейся в поле действия крупной частицы, будет определяться величиной и направлением силы, являющейся суперпозицией архимедовой силы и сил, динамического воздействия жидкости.

Сложная физическая картина, возникающая при оседании частиц в случае, когда их размеры существенно различны (от микрон до нескольких метров), практически исключает возможность строгого аналитического описания процесса распада селевой массы. Поэтому данные о распаде селевой массы проще и надежнее могут быть получены экспериментальным путем.

Оседание твердых частиц селевой массы приводит к образованию каркаса, опирающегося на дно русла, уменьшающего придонное гидростатическое давление и резко изменяющего текучесть селевой массы. Время, за которое все твердые частицы селевой массы при отсутствии взвешивающих сил осядут, образуя твердый скелет, будем называть периодом распада селевой массы. Однако на практике измерение периода распада сопряжено со значительными трудностями, ибо в зависимости от плотности селевой массы, гранулометрического и минералогического составов ее твердого компонента он может колебаться от нескольких секунд до нескольких суток. Поэтому рационально по аналогии с известным понятием атомной физики введение периода полураспада селевой массы [110].

Под периодом полураспада селевой массы будем понимать время, за которое половина объема твердого компонента селевой массы (единичной

высоты) в условиях, исключающих взвешивание твердых частиц (за счет поступления дополнительной энергии извне) и выклинивание воды, опустится на дно, образуя при этом твердый скелет.

В отличие от атомного период полураспада селевой массы не характеризует ее распад в целом. Это объясняется тем, что скорости оседания частиц различной крупности существенно отличаются и, следовательно, в процессе распада селевой массы ее состав и свойства изменяются. Тем не менее измерение периода полураспада позволяет оценить интегральные характеристики распада конкретной селевой массы, в частности скорость ее распада. Введение понятия периода полураспада существенно упрощает и аналитическое описание динамических особенностей селевого процесса, так как период полураспада является показателем, суммирующим влияние на свойства селевой массы таких ее основных физико-механических характеристик, как плотность селевой массы, минералогический и гранулометрический составы ее твердого компонента.

Глава 4

МЕХАНИЗМЫ СЕЛЕФОРМИРОВАНИЯ

Сели как природное явление граничат с оползнями и паводками. Естественно поэтому, что история селеведения начиналась с борьбы двух гипотез о природе селевых потоков, вылившейся в признание еще на первых всесоюзных селевых конференциях факта существования двух категорий селевых потоков, названных тогда турбулентными и структурными. М. А. Великанов [111], поддерживая гидрологическую природу селей, писал, отмечая качественные отличия процессов, приводящих к формированию селей этих двух категорий: «Текучие (или турбулентные) сели, в которых активная роль принадлежит воде, а твердый материал переносится водою в результате гидродинамического ее воздействия ..., сели этой категории движутся согласно общим законам гидродинамики, хотя и в обстановке, осложненной большим количеством твердых тел. Связные (структурные) сели, в которых насыщение воды взвешенным мелкоземом достигло того предела, когда качество селевой массы существенно меняется. Жидкая часть начинает играть лишь роль смазки между почти соприкасающимися крупными включениями, активная же роль в движении селевой массы переходит именно к этим включениям. Движение селей этой категории уже выходит за пределы тех движений, которые изучаются в гидродинамике. Здесь мы наблюдаем как бы переход к «оплывине»... И далее: «Концентрация глины в воде, а также относительный объем жидкой части селевой массы определяют в основном динамические свойства селевого потока».

Считалось, что турбулентные сели формируются при взаимодействии водного потока с вмещающими их рыхлообломочными породами, а структурные – в результате сдвига и перехода в текучее состояние водонасыщенных грунтов. Однако попытки описания селей традиционными методами, использующимися в гидрологии и инженерной геологии, не привели к положительным результатам.

Адекватность моделей селеформирования реальным природным процессам определяется степенью достоверности знаний о природе селевых явлений. Существенный прогресс в понимании причин возникновения селей, механизмов их образования достигнут в результате проведения в последние десятилетия обширного комплекса экспедиционных исследований в различных географических зонах СССР, искусственного воспроизведения селей на Шамалганском полигоне и работ по предотвращению формирования мощных селей в Иле Алатау, развития реологии селевой массы.

Причинами возникновения селей могут быть:

прорыв водоемов (моренных, ледниковых и завальных озер, внутриморенных и внутриледниковых водоемов, озер в кратерах вулканов, хвостохранилищ и отстойников и т.д.);

интенсивное таяние снега и льда в процессе извержения вулканов;

выпадение интенсивных жидких осадков;

переувлажнение рыхлообломочных пород, приводящее к увеличению порового давления и уменьшению сцепления между частицами;

потеря устойчивости увлажненных грунтов в результате землетрясений и т.д.

Особенности селевых процессов определяются геологическими и морфометрическими характеристиками селевых очагов, условиями обводнения рыхлообломочных пород в селевом очаге.

Вовлечение твердого компонента в процесс селеформирования происходит в результате воздействия на него силы тяжести и сил, возникающих при взаимодействии водного потока с рыхлообломочными породами. В зависимости от особенностей протекания селевого процесса роль этих сил может быть существенно различной. Это обстоятельство позволило А. И. Шеко выделить «два типа зарождения селевых потоков: эрозионный и оползневой». По А. И. Шеко, в процессе эрозии происходит разрушение структурных связей в грунте; сдвиг и перенос частиц осуществляются водой или суспензией. Оползневое зарождение селей характеризуется сдвижением рыхлообломочных пород в условиях слабого нарушения его структуры. Дальнейшее увлажнение и деформация приводят к разрушению жестких связей и превращению оплывины или оползня потока в селевой поток [7].

Оценивая силы, приводящие в движение твердый материал, С. М. Флейшман [53] приходит к выводу о решающей роли в обсуждаемом процессе гидромеханических и гравитационных сил.

Ю. Б. Виноградов различает три типа селевых процессов: транспортный, эрозионно-сдвиговый (позднее названный им же транспортно-сдвиговым) и сдвиговый. В основе этой классификации лежат понятия о критическом уклоне и расходе. Возможность развития того или иного типа процесса в зависимости от характеристик рыхлообломочных пород определяется значениями критических уклонов, выше и ниже которых развиваются селевые процессы одного из трех типов [112].

Исследования, выполненные в КазНИГМИ, показали, что эта классификация, сыгравшая в свое время положительную роль, с современных представлений механики селей может рассматриваться как удовлетворительная лишь с позиций преемственности в эволюции фундаментальных представлений о механизмах селевых явлений, так как при ее создании не учитывались характер увлажнения грунтов, объем и расход селевых потоков, реологические свойства селевой массы и т.д.

Стало очевидным, что неверен основной постулат этой классификации – зависимость того или иного процесса от величины уклона. Процесс эрозионно-сдвигового вовлечения рыхлообломочных пород в селеформирование может иметь место и на уклонах в первые единицы (и даже доли) градуса, при этом плотность селевой массы, как правило, превышает 2200–2350 кг/м^3 и тем более на уклонах, отводимых классификацией для сдвигового процесса.

Разжижение водонасыщенных лёссовых грунтов во время 6–8-балльных землетрясений приводит к их сдвигу и течению на уклонах, не превышающих 3–5°, т.е. уклонах, отводимых обсуждаемой классификацией для транспортных (эрозионно-транспортных) процессов.

Поэтому в дальнейшем, пользуясь терминологией, рекомендуемой в [113] (синонимы даны в скобках), и различая три основных типа селевых процессов: транспортный (эрозионно-транспортный), эрозионно-сдвиговый (эрозионный, сдвигово-эрозионный, транспортно-сдвиговый) и сдвиговый, будем иметь в виду, что приведенные термины характеризуют лишь превалирующие механизмы вовлечения рыхлообломочных пород в процесс селеформирования в его начальной фазе.

Селевые явления относятся к процессам, характер течения которых определяется действием обратных связей. Транспортный процесс характеризуется преобладанием отрицательных обратных связей; при эрозионно-сдвиговом селевом процессе положительные обратные связи могут превалировать вплоть до такой степени, когда становятся значимы потери энергии, обусловленные вязкопластическими свойствами селевой массы. В условиях преобладания положительных обратных связей вовлечение твердого компонента может носить лавинообразный характер, ибо суммарная энергия, отдаваемая частицами потоку, превышает энергию, затраченную потоком на вовлечение их в движение.

Под сдвиговым селевым процессом понимается сдвиг увлажненных грунтовых масс под действием силы тяжести. Механизмы сдвиговых селевых процессов практически не отличаются от таковых оползней, однако объектами исследований являются лишь сдвиговые явления, совпадающие по времени и месту с аномальными гидрометеорологическими процессами [18]. После того, как сдвижение масс переходит в русловой процесс, сдвиговый процесс трансформируется в эрозионно-сдвиговый селевой процесс.

Рассматриваемые типы селеформирования, несмотря на кажущиеся различия, являются звеньями единой цепи физических процессов, обусловливающих селевые явления в целом. Деление селевых явлений на три процесса существенно упрощает их математическое описание. Однако при использовании моделей для практических расчетов следует помнить о том, что указанное деление условно. В реальных условиях мы имеем, как правило, дело с нестационарными процессами. В качестве примера можно привести селепроявление в долине р. Есик (Иле Алатау, 1963 г.), развивавшееся по схеме: водный поток → эрозионно-сдвиговый процесс → распад и остановка селя в озерной котловине озера Есик → водный поток → эрозионно-сдвиговый процесс → частичный распад селевой массы → транспортный селевой процесс → наносоводный поток.

Активное взаимовлияние эрозионно-сдвигового и сдвигового селевых процессов в условиях аномально высокого увлажнения рыхлообломочных пород обусловливает течение так называемых цепных селевых процессов [12], в результате которых формируются сели с расходом и объемом, на порядки превышающим эти характеристики водных (сосредоточенных или фильтрационных) потоков, послуживших толчком к развитию цепных селевых процессов.

4.1. Критические условия зарождения и существования селей

Важнейшими факторами взаимодействия водных потоков с рыхлообломочными породами, вмещающими русло, являются гранулометрический и минералогический составы рыхлообломочных пород, уклон русла и расход водного потока на входе в селевой очаг.

Сели формируются, если уклон русла и расход водного потока превышают критические значения. В противном случае образуется паводок, несущий наносы. В паводках значительная доля энергии смеси воды и взвешенных частиц может затрачиваться на перемещение крупных фракций. В селях перемещение частиц осуществляется в основном за счет их собственной потенциальной энергии. Критические значения уклона русла и расхода водного потока в значительной мере определяются гранулометрическим и минералогическим составом пород, принимающих участие в селеобразовании.

Критические значения уклона русла и расхода водного потока взаимозависимы: с увеличением уклона критическое значение расхода уменьшается, но до определенных пределов. Расход водного потока должен быть таким, чтобы всегда имелась возможность размыва и выноса материала, окружающего крупные частицы. В противном случае в русле образуется отмостка.

Величина уклона русла должна обеспечивать движение частиц со средней скоростью потока. В толще турбулентного потока осредненная во времени продольная составляющая скорости перемещения взвешенных частиц практически не отличается от местной скорости потока на той же высоте над дном русла.

При транспорте наносов крупные частицы движутся скольжением, скачкообразно (сальтация) и качением. При этом скорость движения упомянутых частиц меньше скорости смеси воды и взвешенных в ней мелких частиц, поскольку при равенстве скоростей поток не в состоянии передавать частицам энергию, необходимую для их перемещения. Следствием этого будет увеличение во времени концентрации крупных частиц в придонной зоне, что при достаточно большой длине эродируемого русла может приводить к его отмостке или образованию движущегося слоя из крупных частиц, затрудняющего эрозионное воздействие потока на русло.

Если селеформирующие породы представлены ледниковыми отложениями, то они содержат частицы, размеры которых могут превышать несколько метров. При проведении экспериментов на Шамалганском полигоне на первых сотнях метров длины главного селевого очага, когда плотность потока изменялась от 1000 до 1300–1500 кг/м^3, скорость продвижения фронта потока (что соответствует средней скорости потока) была 4–6 м/с. В таких условиях вертикальные составляющие скорости потока не могли обеспечить взвешивание крупных частиц, вовлекавшихся в селеформирование. О зависимости скорости падения частиц (шарообразной формы и плотностью 2650 кг/м^3) в водной среде от их размеров можно судить по данным, приведенным на рисунке 4.1.

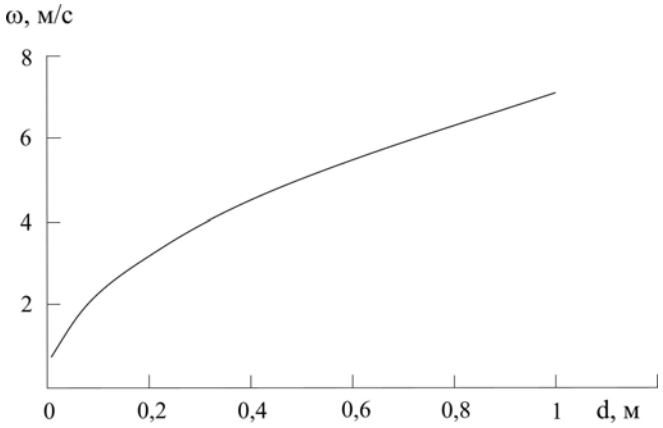


Рисунок 4.1. Зависимость скорости падения частиц от их размера

Чем же объяснить тот факт, что крупные частицы (более одного метра) перемещались со скоростью, не меньшей, чем средняя скорость потока, если они не находились во взвешенном состоянии за счет энергии жидкого компонента селевой массы, а угол наклона селевого очага (менее 17°) не обеспечивал в начальной фазе селеобразования сдвиг частиц за счет действия гравитации (см. таблица 2.6)?

Экспериментально доказано, что это происходит благодаря качению крупных частиц на уклонах более 12° с заведомо большими скоростями, чем скорость движения потоков при глубинах, соизмеримых с размерами крупных частиц, под действием силы тяжести. В ходе экспериментов по искусственному воспроизведению селей на Шамалганском полигоне было установлено, что скорость перемещения жидкого и твердого компонентов плотной селевой массы (2300–2400 кг/м^3) практически одинакова и на значительно меньших уклонах (5–7°). На это указывало то, что при продвижении селя с расходом 460 м^3/с в русле, выполненном в коренных породах (что практически исключало возможность дальнейшего обогащения потока твердым компонентом) и длиной около 700 м, какого-либо опережения водой (суспензией) крупных фракций во фронтальной зоне потока не наблюдалось. Указанное обстоятельство свидетельствует о том, что крупные фракции твердого компонента селевой массы перемещаются под действием силы тяжести самостоятельно, а не транспортируются водой (суспензией).

Крупные фракции твердого компонента селевой массы могут перемещаться со средней скоростью потока и на относительно малых уклонах (2–5°). Это происходит, если вязкопластические свойства селевой массы обеспечивают поддержание упомянутых частиц в квазивзвешенном состоянии (таблица 4.1). Под квазивзвешенным состоянием частицы в дальнейшем будем понимать ее состояние, при котором она не имеет жесткого контакта с руслом (кулоновское трение отсутствует), будучи поддерживаемой вертикальными составляющими скорости потока и (или) структурными связями, обусловленными наличием у среды вязкопластических свойств.

Таблица 4.1. Зависимость размера частиц, удерживаемых в квазивзвешенном состоянии, от предельного напряжения сдвига и плотности селевой массы, м

Плотность селевой массы, кг/м^3	Предельное напряжение сдвига селевой массы, Н/м^2			
	300	500	1000	2000
1700	0,136	0,227	0,454	0,908
2000	0,219	0,366	0,732	1,464
2300	0,408	0,680	1,36	2,72
2400	0,571	0,952	1,904	3,81

Возможна и другая ситуация: глубина потока превышает размеры этих частиц (частицы полностью погружены), а плотность селевой массы достаточно велика. Тогда даже в ситуациях, когда вязкопластические свойства селевой массы не обеспечивают поддержание крупных частиц в квазивзвешенном состоянии, крупные частицы способны преодолеть силу кулоновского трения даже на относительно малых уклонах (таблица 4.1).

Остановка и отложение мощных селей происходит на конусах выноса, расположенных на предгорной равнине. В зависимости от свойств селевой массы, уклона конуса выноса и расхода селевого потока отложение селей может происходить как при постоянном гранулометрическом составе твердого компонента селевой массы, так и при изменяющемся. В последнем случае остановка наиболее крупных фракций будет происходить преимущественно в верхней части конуса выноса, где уклоны наибольшие, а отложение суспензии – на его периферии.

4.2. Транспортный селевой процесс

Особенностью транспортного селевого процесса является то, что поток затрачивает на перенос частиц энергию, превышающую по величине их потенциальную энергию, т.е. перенос твердого компонента требует затрат энергии жидкого компонента. При этом благодаря действию отрицательных обратных связей концентрация твердого компонента в потоке находится в прямой зависимости от уклона русла.

Транспортный селевой процесс может реализоваться в следующих ситуациях:

при интенсивном поверхностном обводнении массива рыхлообломочных пород, характеризующегося небольшой длиной и уклоном, высокой степенью устойчивости к водной эрозии;

при поступлении в русла горных рек воды в результате ливней, прорыва озер, водохранилищ и т.д. с расходом, превышающим бытовые расходы и переформирующим отмостку русел;

вследствие частичного распада селевой массы при их движении на относительно малых уклонах;

в результате частичного распада селевой массы большой плотности, вызванного слиянием селей с водными потоками в руслах, имеющих относительно малые уклоны.

Транспортный селевой процесс не имеет качественных отличий от процесса транспорта твердого компонента водным потоком. Условно за нижнюю границу плотности селевой массы, образующейся в результате транспортного селевого процесса, принято 1100 кг/м^3 [114], что при плотности частиц, равной 2650 кг/м^3, соответствует объемной концентрации C=0,06. За верхнюю границу плотности селевой массы при транспортном селевом процессе принимается значение, соответствующее ситуации, при которой затраты энергии на перемещение твердого компонента в составе потока становятся равными энергии, высвобождающейся при переходе твердых частиц с одного (более высокого) потенциального уровня на другой, относительно низкий уровень.

При расчете характеристик селей малой плотности наибольший практический интерес представляют объем твердого компонента, выносимого селевым потоком на территорию хозяйственной деятельности, а также предельно возможные концентрации твердого компонента в селевой массе. Задача об объеме выносимого материала лишь в первом приближении решена для случая эрозионного смыва почвогрунтов, слагающих поверхности бассейнов рассредоточенного селеформирования. Еще более проблематичным представляется создание моделей, описывающих изменение характеристик селей малой плотности во времени и пространстве.

Предельно возможная концентрация твердого компонента в селевой массе является сложной функцией морфометрии русла, характеристик потока, минералогического и гранулометрического составов твердого компонента селевой массы.

Как отмечалось, твердый компонент селевой массы в ходе транспортного селевого процесса перемещается в виде взвешенных и донных (влекомых) наносов. Наибольшую сложность при разработке моделей, описывающих процессы переноса частиц во взвешенном состоянии, представляет учет гранулометрического состава твердого компонента при его концентрации, существенно превышающей типичные значения, рассматриваемые в гидрологии.

Значительный вклад в создание теории транспорта твердых частиц, перемещающихся во взвешенном состоянии в составе селевой массы, сделан М. А. Великановым, Р. Багнольдом, Г. И. Баренблатом, М. А. Мостковым, И. В. Егиазаровым, А. В. Караушевым, О. Г. Натишвили, Ц. Е. Мирцхулавой, А. В. Магомедовой, В. Г. Саноянном, Р. Г. Асатряном, Ю. М. Денисовым и другими исследователями.

Один из наиболее разработанных методов расчета характеристик селей малой плотности [115] основан на результатах анализа уравнения энергетического баланса полной энергии наносонесущего потока для случая плоскопараллельного квазистационарного движения, полученных В. Г. Саноянном [116, 117].

Структура формул для определения транспортирующей способности потоков достаточно сложна, поэтому о физических процессах, заложенных в моделях, легче судить по результатам расчетов, представленных на рисунке 4.2. Нетрудно видеть, что содержание твердого компонента в селевой

массе находится в прямой нелинейной зависимости от глубины потока и уклона русла. Зависимость транспортирующей способности от уклона русла носит непрерывный и однозначный характер.

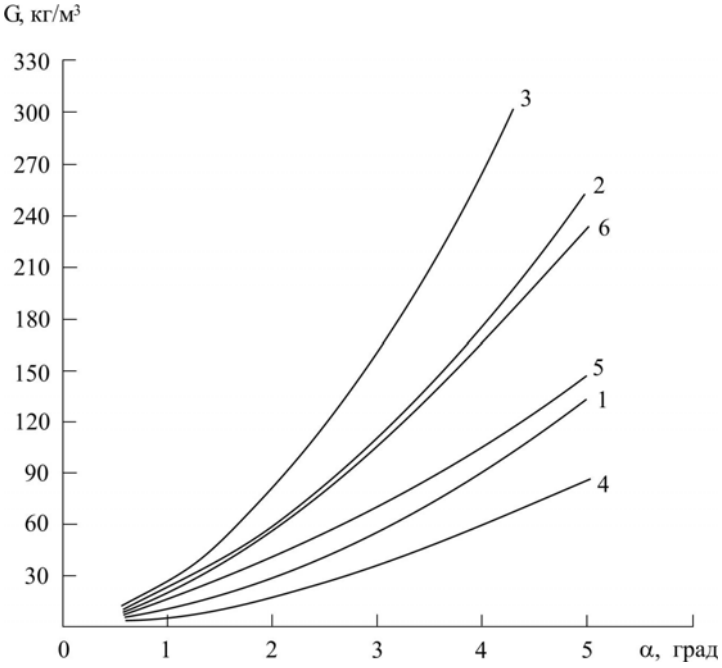


Рисунок 4.2. Зависимость транспортирующей способности потока от уклона русла и глубины потока по В. Г. Санояну.
d=0,3 мм (*1–3*); *d*=2,0 мм (*4–6*); *H*=0,5 м (*1*, *4*); *H*=1,0 м (*2*, *5*); *H*=1,5 м (*3*, *6*)

Зависимость транспортирующей способности от гидравлической крупности частиц позволяет утверждать, что работоспособность моделей может сохраняться лишь до тех пор, пока скорость падения ансамбля частиц незначительно отличается от гидравлической крупности отдельной частицы, т.е. до значений, соответствующих объемной концентрации от 5 до 10 % твердого компонента в селевой массе.

Как правило, расход взвешенных наносов при транспортном селевом процессе значительно превосходит таковой влекомых наносов. Однако перенос частиц путем качения и скольжения играет большую роль при постселевых явлениях.

Наблюдения за процессами переноса твердых частиц воздушной струей в аэродинамической трубе, водным потоком в лотках свидетельствуют о том, что массовое движение частиц, имеющих непосредственный контакт с дном, происходит лишь в случае, когда гравитационная составляющая силы, действующей на частицы, соизмерима с гидродинамическим воздействием потока на влекомые наносы, т.е. на относительно больших уклонах.

На уклонах, типичных для предгорных зон (1–5°) в условиях, когда твердый компонент селевой массы представлен полидисперсными частицами, массовое движение донных наносов путем скольжения под действием

напряжений, приложенных со стороны потока, маловероятно. Как правило, большая часть наносов перемещается сальтацией, меньшая – качением и лишь весьма незначительная – скольжением.

Перемещение частиц сопровождается их соударениями и ударами частиц о русло. Движение частиц характеризуется крайней неравномерностью: от остановки до скоростей, близких к таковым жидкого компонента.

Отмеченное обстоятельство настолько усложняет математическое описание кинематики движения частиц, что на современном этапе развития науки единственно приемлемым подходом к определению количественных характеристик движения влекомых наносов является привлечение энергетического метода. Фактором, благоприятствующим использованию этого метода, является и то обстоятельство, что перенос влекомых наносов осуществляется в основном за счет энергии жидкого компонента взвесенесущего потока, так как вкладом потенциальной энергии твердого компонента в полный энергетический баланс процессов переноса можно пренебречь.

Обстоятельный критический анализ состояния проблемы расчета расхода донных (влекомых) наносов дан в работе Ю. Б. Виноградова [118]. Следуя И. В. Егиазарову, Ю. Б. Виноградов полагает, что «... переход от обычного водного потока к селевому наносоводному совпадает со срывом отмостки и что это имеет место при $Q_в > Q_{кр}$. В этом случае весь верхний слой русловых отложений под воздействием потока суспензии приходит в движение».

Окончательное выражение для определения расхода твердого компонента, перемещающегося в виде донных наносов, записывается в виде [118]

$$G = C_2 \frac{\rho_s}{\rho_T - \rho_s} \frac{tg\alpha}{tg\varphi_м^*} \left(Q_в - Q_{кр} \right), \tag{4.1}$$

где C_2 – коэффициент; ρ_s – плотность суспензии, кг/м^3; $tg\alpha$ – уклон русла; $tg\varphi_м^*$ – динамический угол внутреннего трения мокрой породы, град; $Q_в$ – расход водного потока, м^3/с; $Q_{кр}$ – критический расход воды, м^3/с.

Практически идентичное выражение для определения расхода донных наносов предложено М. А. Мостковым [119]:

$$G = \frac{\rho_o}{\rho_T - \rho_o} \frac{i}{f} \left(Q_в - Q_o \right), \tag{4.2}$$

где i – уклон русла; f – «коэффициент трения наносов, учитывающий гидродинамические условия на стенке»; $Q_в$ – расход водного потока, м^3/с; Q_o – расход начала влечения частиц при заданном уклоне i, м^3/с.

Информация о гранулометрическом составе наносов используется в работах [118] и [120] только при определении значений $Q_{кр}$ и Q_o и, следовательно, не учитывается при $Q_в >> Q_{кр}$ (Q_o).

В формуле И. В. Егиазарова [120]

$$G = 0{,}015 \frac{\rho_o}{\rho_T - \rho_o} Q_в \sqrt{i} \left(\frac{d_{\max}}{d_{50}} - 1 \right), \tag{4.3}$$

где d_{max} и d_{50} – максимальный и медианный размеры частиц, перемещающихся при расходе воды $Q_в$, мм.

$$d_{\max} = \frac{Hi\rho_o}{f(\rho_T - \rho_o)}, \quad f \approx 0{,}02 - 0{,}03, \tag{4.4}$$

где H – глубина водного потока, м.

В формуле А. Ю. Умарова [121]

$$G = 0{,}125\frac{\rho_o}{\rho_T}Q_в\sqrt{i}\left[\frac{0{,}4\rho_o V_{ср}^2}{(\rho_T - \rho_o)gd_{ср}} - 1\right], \tag{4.5}$$

где $V_{ср}$ – средняя скорость потока, м/с; $d_{ср}$ – средний размер частиц, м.

Сопоставляя приведенные уравнения в ситуациях, когда $Q_в >> Q_{кр}$, что эквивалентно требованию участия в процессе транспорта всех крупностей частиц, нетрудно видеть, что расход твердого компонента в формулах М. А. Мосткова и Ю. Б. Виноградова находится в прямой зависимости от уклона русла i, в формуле И. В. Егиазарова – $i^{0,5}$, а в формуле А. Ю. Умарова – $i^{1,5}$.

Столь серьезное расхождение в оценке влияния уклона на расход влекомых наносов свидетельствует об отсутствии надежных экспериментальных данных, которые могли бы подтвердить те или иные представления о роли такого важного фактора, как уклон русла. Видимо, это обстоятельство позволило Ю. Б. Виноградову при анализе обоснованности формул для расчета расхода влекомых наносов заметить: «Скудность экспериментальных данных заставляет авторов формул оценивать по ним численные коэффициенты и по этим же данным проверять сходимость своих выражений, посрамляя при этом авторов других предложений» [118].

4.2.1. Примеры селепроявлений

Типичным примером транспортного селевого процесса может служить перенос большого объема рыхлообломочных пород паводком, образовавшимся в результате прорыва подпруженного озера (ледник Медвежий, 1973 г.). Русло р. Абдукагор, сформированное расходами 15–25 м^3/с, не могло противостоять натиску паводка, расход которого достигал 1000 м^3/с. Мощное воздействие потока на русло реки и дно долины привело к срыву отмостки и массовому перемещению сотен тысяч кубометров грунта на десятки километров. Перенос рыхлообломочных пород осуществлялся как во взвешенном состоянии, так и в виде донных наносов. Максимальные размеры перемещаемых частиц достигали одного метра.

Транспортным селевым процессом заканчивались и все эксперименты по воспроизведению грязекаменных селей на Шамалганском полигоне. По мере разбавления селевой массы водами р. Шамалган происходил их частичный распад. Мелкие фракции переносились во взвешенном состоянии постселевыми паводками, более крупные частицы в виде донных наносов перемещались в виде компактных массивов в течение нескольких дней после прохождения селей.

4.3. Эрозионно-сдвиговый селевой процесс

Эрозионно-сдвиговый селевой процесс – процесс взаимодействия сосредоточенного водного потока с рыхлообломочными породами, включающий размыв грунта, сдвиг и вовлечение в движение крупных частиц и локальных массивов рыхлообломочных пород, приводящий, как правило, к формированию грязекаменных селей. Эрозионное углубление русел в ходе селевых процессов сопровождается потерей устойчивости их бортов. Если грунты насыщены водой, процессы обрушения могут приводить их в текучее состояние. Исходные характеристики потоков при этом резко возрастают.

При благоприятных условиях (большие уклоны и длина селевых очагов, наличие увлажненных слабосцементированных грунтов) в результате эрозионно-сдвиговых селевых процессов водные потоки трансформируются в грязекаменные, расход и объем которых в 10–25 раз и более превышают таковые исходных водных потоков, плотность селевой массы достигает 2400–2500 кг/м^3.

4.4. Критические условия возникновения селей

Важнейшими селеформирующими факторами являются уклон русла, гранулометрический состав рыхлообломочной породы и расход водного потока. При превышении ими критических значений развивается селевой процесс.

По Ю. Б. Виноградову, транспортно-сдвиговый селевой процесс развивается при расходе воды и уклоне, превышающих критическое значение. При этом «... порода ... приобретает возможность самостоятельного массового лавинного движения и, перемещаясь вместе с водой, перемешивается и в конце концов формирует селевую массу высокой плотности» [118].

Критическое значение уклона русла вычисляется по формуле

$$tg\alpha = \frac{(\rho_T - \rho_o)(1-\varepsilon)}{\rho_T(1-\varepsilon)+\rho_o\varepsilon} tg\varphi_м^*, \qquad (4.6)$$

где ε – пористость рыхлообломочной породы, доли ед.; $tg\varphi_м^*$ – динамический угол внутреннего трения мокрой породы, град.

Выражение $(\rho_T - \rho_o)tg\varphi_м^*$ в формуле для вычисления критического значения уклона свидетельствует о том, что в обсуждаемой модели все частицы жестко контактируют между собой, т.е. сопротивление движению обусловлено кулоновским трением.

Нетрудно показать, что формула (4.6) близка к формуле, предложенной Р. Багнольдом [122] для определения критического значения уклона, на котором могут произойти сдвиг и перемещение каменистых осыпей при их обводнении.

Отмеченное обстоятельство позволяет утверждать, что, несмотря на некоторые отличия качественного описания процессов, в работах Р. Багнольда и Ю. Б. Виноградова описан один и тот же механизм селеформирования:

сдвиг и перемещение водонасыщенных грунтов, особенностью которых является отсутствие сцепления.

Роль водного потока, расход которого должен превышать критическое значение, заключается, по мнению Ю. Б. Виноградова, в создании условий «... для сдвига наиболее крупных камней поверхностного слоя ПСМ. Водный поток с критическим расходом, поступающий в селевой врез, рытвину или русло, активно размывает рыхлообломочные отложения, вовлекая в транспортный процесс мелкозем, дресву и щебень и обнажая крупнообломочный каркас ПСМ ... От возможности вовлечения их в движение и зависит формирование селя. В противном случае быстро будет создана крупновалунная или глыбовая отмостка русла, исключающая дальнейшее развитие любого селевого процесса» [118].

Приведенная цитата позволяет понять, почему в формуле (4.6) присутствует динамический угол внутреннего трения мокрой породы. В рамках обсуждаемой модели наиболее благоприятные условия для движения создаются при малых значениях коэффициента упаковки, т.е. когда грунт представлен практически одинаковыми по размеру частицами.

При полидисперсном гранулометрическом составе селеформирующих пород процесс образования селевой массы в результате взаимодействия сосредоточенного водного потока с рыхлообломочными породами существенно отличается от механизма, описанного в работах [118, 122]. Основная масса частиц, пришедших в движение при размыве грунта, перемещается во взвешенном состоянии, а крупные фракции – качением. Причем средняя скорость движения взвешенных частиц равна средней скорости движения потока в целом, а скорость качения частиц равна или даже превышает (до определенных концентраций твердого компонента в селевой массе) скорость потока.

Т. Л. Киренская [123] показала, что скорость качения частиц зависит от их размера и формы, уклона и характеристик подстилающей поверхности. В результате экспериментальных исследований было установлено, что качение частиц без отрыва является частной, редко встречающейся формой движения. Наиболее типичный способ перемещения частиц – качение с отрывом, т.е. скачкообразное движение. Причем характер скачкообразного движения частиц неправильной формы существенно отличается от скачкообразного движения, рассматриваемого классической механикой. Было найдено, что отрыв частиц является результатом не упругого взаимодействия, а резкого изменения кинетического момента при изменении положения осей вращения относительно частиц.

Скорость качения частиц в воздушной среде определяется с помощью выражения [123]

$$V_к = 0{,}013d + 15{,}8\sin\alpha - 1{,}90, \qquad (4.7)$$

где d – осредненный по трем осям поперечный размер частицы, мм.

Значение критического уклона находится из условия равенства скорости движения водного потока и частиц, входящих в группу, перемещающуюся качением, и имеющих максимальные размеры в упомянутой груп-

пе. Для решения задачи необходимо найти тот граничный размер, ниже которого частицы еще взвешиваются потоком, а выше перемещаются качением.

Размер максимальных фракций, взвешиваемых потоком, находится из равенства гидравлической крупности этих фракций ω вертикальным пульсационным скоростям потока

$$\omega = k\sqrt{gH\sin\alpha}\,, \tag{4.8}$$

где k – коэффициент, изменяющийся (по мнению различных исследователей) от 1 до 4.

Наиболее реальным является, скорее всего, значение k=1,05, предлагаемое Р. Г. Асатряном [124].

Для определения средней скорости водного потока обычно используется формула Шези:

$$V_{ср} = C\sqrt{H\sin\alpha}\,, \tag{4.9}$$

где C – коэффициент Шези.

Приравнивая уравнение (4.8) к уравнению (4.9), устанавливают критическое значение уклона селевого очага.

Расчет скорости движения воды в условиях большой шероховатости, характерной для селевых русел, вызывает определенные трудности, связанные с тем, что теория движения потоков в условиях большой шероховатости разработана недостаточно. Поэтому в КазНИГМИ были проведены эксперименты по определению коэффициента Шези в условиях шероховатости Δ, соизмеримой с размерами потока. В результате было получено регрессионное уравнение [123]:

$$C = 6{,}27\frac{H}{\Delta} - 12{,}52\sin\alpha + 3{,}79\,. \tag{4.10}$$

Коэффициент множественной корреляции R=0,80.

Заслуживает внимание ситуация, при которой рыхлообломочные породы представлены настолько мелкими частицами, что все они переносятся в составе потока во взвешенном состоянии. Казалось бы, что с уменьшением размера частиц уклон, на котором возможно формирование плотной селевой массы (это относится и к глубине водного потока), будет также неограниченно уменьшаться. При этом естественно ожидать (если породы, вмещающие русло водотока, представлены пылевато-глинистыми фракциями), что селевые процессы могут реализоваться на уклонах, составляющих доли – первые единицы градусов. Однако это не происходит, прежде всего, потому, что упомянутые грунты обладают сцеплением.

Размывающая способность потоков, имеющих незначительную глубину и текущих на малых уклонах, оказывается недостаточной для того, чтобы при ограниченной длине русла происходило насыщение селевой массы твердым компонентом. Следует иметь в виду и то обстоятельство, что с увеличением плотности селевой массы происходит нелинейное возрастание ее вязкопластических свойств, резко отражающихся на размывающей способности потоков.

В природе, как правило, все сбалансировано; и сам факт накопления рыхлообломочных пород, представленных пылевато-глинистыми фракциями, свидетельствует об отсутствии факторов (ветер, водные потоки), благоприятствующих их переносу на относительно низкие потенциальные уровни. Ситуация резко меняется, если в природные процессы по незнанию или халатности вмешивается человек. Тогда в пустынях формируются сели, по своим масштабам на порядки превышающие явления, типичные для гор.

Как показали наблюдения, выполненные в последние десятилетия, эрозионно-сдвиговые селевые процессы могут развиваться и в условиях, когда расход водных потоков не достигает критического значения. Селевые процессы инициируются сдвигом относительно небольших объемов водонасыщенных грунтов в верхних частях селевых очагов. Масштабы селеформирования определяются их морфометрическими характеристиками, степенью насыщения грунтов водой, гранулометрическим и минералогическим составами последних, объемом воды в руслах водотоков.

Примером такого селеформирования может служить явление, наблюдавшееся в селевом очаге в бассейне р. Кумбель 5 августа 1977 г. [125]. Утро было ясным и безветренным. Внезапно произошло обрушение борта селевого вреза в его верхней части. Разрушившиеся при ударе сцементированные блоки моренных отложений перекрыли водный поток, протекавший во врезе (его расход не превышал первых сотен литров в секунду), на площади 200–250 м^2. Вода в течение нескольких минут насыщала обрушившийся грунт. Практически сразу после того, как по поверхности обрушений возобновилось движение воды, начались подвижки водонасыщенного грунта. В течение первых десятков секунд обводненный массив потерял устойчивость и, быстро трансформируясь в однородную селевую массу, двинулся вниз по селевому очагу.

Угол наклона участка селевого очага, на котором произошел сдвиг, составлял 20–25°. На всей 1100-метровой длине селевого очага поток, скорость которого превышала скорость водного потока, вбирал в себя русловую воду и, взаимодействуя с рыхлообломочными породами, обогащался твердым материалом. На выходе из селевого очага расход потока составлял не менее 200–300 м^3/с; дальность селевого выброса – 5–6 км, плотность селевой массы – 2350–2400 кг/м^3.

Можно ли считать, что описанный селевой процесс является сдвиговым селевым процессом? Ответ, по нашему мнению, отрицательный. Действительно, начальный расход селя составлял 3–5 м^3/с. Возрастание расхода и объема потока по мере его движения ничем не отличалось по физической сути от процесса, который имел бы место при поступлении в селевой очаг водного потока с расходом 3–5 м^3/с. Следовательно, был типичный эрозионно-сдвиговый селевой процесс.

Определение критических условий селеформирования для описываемой ситуации состоит из двух этапов:

расчета критического уклона;

определения критической величины объема сдвигающихся масс.

Критический уклон русла оценивается с помощью уравнения

$$\sin\alpha = \frac{gfH\left[\left(\rho_T - \rho\right)C_d K_d + \rho_T C_d \left(1 - K_d\right)\right] + \tau_{см}}{\left[\rho\left(1 - C_d\right) + \rho_T C_d\right]gH}, \qquad (4.11)$$

где ρ – плотность среды, вмещающей крупные частицы, кг/м^3; C_d – объемная концентрация частиц, выступающих над поверхностью потока вследствие превышения линейных размеров частиц над вмещающей их средой; K_d – отношение объема погруженной части частиц ко всему их объему; $\tau_{см}$ – предельное напряжение сдвига селевой массы, включающей в себя частицы, удерживаемые в квазивзвешенном состоянии за счет свойства пластичности селевой массы, Н/м^2.

Критический объем обрушений грунта в селевом очаге определяется из условия равенства приращения массы селевого потока (на единице длины селевого очага) массе, остающейся в русле после прохождения селем того же единичного участка.

4.4.1. Модели селеобразования

Первыми концептуальными моделями эрозионно-сдвигового селевого процесса были модели с сосредоточенными параметрами – селевой очаг рассматривался как единое целое и характеризовался длиной и средним уклоном, например [112].

Образование селевой массы в ходе взаимодействия сосредоточенного водного потока с рыхлообломочными породами – сложный процесс, кинематическая структура которого не поддается строгому математическому описанию. В такой ситуации наилучшие результаты при решении проблемы расчета характеристик селя удается получить путем анализа энергетической стороны процесса.

В модели А. И. Шеко, разработанной на основе данных, полученных при изучении размываемости четвертичных отложений долины р. Шинг [7], концентрация твердого компонента в селевой массе определяется с помощью выражения

$$C = \frac{Q_T l}{Q_в}, \qquad (4.12)$$

где Q_T – расход твердого компонента с единицы длины, м^2/с; $Q_в$ – расход воды с учетом влажности размываемой породы, м^3/с; l – расстояние от начала селевого очага до рассматриваемого створа, м.

Размываемость грунта N определяется по формуле

$$N = Q_в\left(H + \frac{V_{ср}^2}{2g}\right), \qquad (4.13)$$

где H – глубина потока, м; $V_{ср}$ – средняя скорость потока, м/с.

В модели Ю. Б. Виноградова [112] расход селя рассчитывается из соотношения

$$Q_c = Q_в + \kappa(1+\zeta)\frac{tg\alpha}{tg\varphi}(\sin\alpha)^{0,22}\left[1-\exp\left(-\frac{l}{L}\right)\right]\left(Q_в^{1,7}-Q_{кр}^{1,7}\right), \quad (4.14)$$

где κ – коэффициент; ζ – относительная объемная влажность рыхлообломочных пород; α – угол наклона ПСМ, град; φ – угол внутреннего трения породы, град; l – расстояние от начала селевого очага до рассматриваемого створа, м; L – длина селевого очага, м; $Q_{кр}$ – критический расход воды, м^3/с.

Относительная объемная влажность рыхлообломочной породы ζ определяется как

$$\zeta = \frac{\theta_o}{(1-\varepsilon)}, \quad (4.15)$$

где θ_o – объемная влажность; ε – пористость породы.

Недостатком модели с сосредоточенными параметрами является не учет изменения энергетических характеристик потока по длине селевого очага, а также свойств селевой массы, существенно влияющих на интенсивность вовлечения грунта в селевой процесс. Присущи этим моделям и другие недостатки. Так, обосновывая необходимость перехода от моделей с сосредоточенными параметрами к моделям с распределенными параметрами, Ю. Б. Виноградов пишет: «... определение на местности, карте или аэрофотоснимке точки, соответствующей «концу очага», оказалось поистине мучительным и необъективным, а истинный уклон как главный фактор, определяющий интенсивность селевого процесса, подменялся осредненной и тем самым фиктивной величиной» [113].

Накопленный к настоящему времени опыт расчета характеристик селей свидетельствует о неоспоримых преимуществах описания селевых процессов с помощью моделей с распределенными параметрами, позволяющих учитывать влияние на ход селевых процессов во времени и пространстве как характеристик потоков, так и свойств селевой массы.

Одна из первых таких моделей эрозионно-сдвигового селевого процесса разработана Ю. Б. Виноградовым [118, 126]. Расчет характеристик селей по этой модели ведется раздельно для очагов формирования (участок русла с уклоном выше критического значения) и участка транзита и затухания селя.

Селевой очаг разбивается на несколько характерных участков, различающихся по углу наклона тальвега. Максимальный расход и объем селевого потока в конце каждого i-го расчетного участка определяются по формулам (при условии $Q_в > Q_{кр}$):

$$\left[\left(Q_c\right)_{\max}\right]_i = \left[1+(1+\zeta)N_i\right]\left(Q_{в\max}+\sum_{j=1}^{i}\Delta Q_{в\,j}\right), \quad (4.16)$$

аналогично

$$W_i = \left[1+(1+\zeta)N_i\right]\left(W+\sum_{j=1}^{i}\Delta W_j\right), \quad (4.17)$$

где N_i – отношение количества твердого материала, захваченного на участке, к количеству воды, вызвавшей селевой процесс; $Q_{в\ max}$ – максимальный расход воды у входа в селевой очаг, м^3/с; $\Delta Q_{вj}$ – дополнительный максимальный приток воды, поступивший на i-й расчетный участок, м^3/с; объем водного паводка (при $Q_в > Q_{кр}$), поступившего в селевой очаг, м^3; ΔW_j – дополнительный объем воды, поступивший на i-й расчетный участок, м^3; N_i определяется как

$$N_i = \frac{G_i}{\left(Q_{в\max} + \sum_{j=1}^{i} \Delta Q_{вj}\right)} = \frac{Z_i}{\left(W + \sum_{j=1}^{i} \Delta W_j\right)}, \tag{4.18}$$

где G_i – максимальный расход твердого материала в селевом потоке, м^3/с; Z_i – максимальный объем твердого материала в селевом потоке, м^3.

Безразмерный коэффициент N_i находится численным способом по трансцендентному уравнению:

$$\frac{\frac{\rho_T}{\rho_o - 1}}{\frac{\rho_T}{\rho_o + \zeta}} \ln \frac{\frac{1}{\left(\frac{\rho_T}{\rho_o + \zeta}\right)} + N_i}{\frac{1}{\left(\frac{\rho_T}{\rho_o + \zeta}\right)} + N_{i-1}} + \frac{1 + \zeta_{nm}}{\zeta - \zeta_{nm}} \ln \frac{1 + N_i(\zeta - \zeta_{nm})}{1 + N_{i-1}(\zeta - \zeta_{nm})} =$$

$$= c_1 g(\rho_T - \rho_o \zeta_{nm}) \frac{tg\alpha}{tg\varphi_{cm}} \sin\alpha (l_i - l_{i-1}), \tag{4.19}$$

где ζ_{nm} – относительная объемная влажность рыхлообломочной породы на пределе текучести; c_1 – коэффициент пропорциональности, изменяющийся от $4 \cdot 10^{-6}$ до $6 \cdot 10^{-6}$ (м$^2 \cdot$с^2)/кг; φ_{cm} – статический угол внутреннего трения водонасыщенной рыхлообломочной породы, град; α – угол наклона расчетного участка, град; l_i, l_{i-1} – верхняя и нижняя точки, ограничивающие расчетный участок по длине селевого очага, м.

Плотность селевой массы на выходе из селевого очага определяется по формуле

$$\rho_{см} = \frac{\rho_o + (\zeta\rho_o + \rho_T)N}{1 + (1 + \zeta)N}, \tag{4.20}$$

где N – безразмерный коэффициент для нижнего участка.

Описанная модель базируется на гипотезах о пропорциональности вовлечения рыхлообломочных пород в селевой процесс элементарной потенциальной мощности потока и коэффициенту текучести селевой массы.

Первая гипотеза, согласно которой элементарная потенциальная мощность находится как

$$\tilde{n} = \frac{E_n}{l}, \tag{4.21}$$

где E_n – потенциальная энергия; l – единица пути; является, по нашему мнению, весьма плодотворной, так как при расчете характеристик селей не требуются данные о морфометрических характеристиках селевого очага (за исключением продольного уклона) и кинематических характеристиках селевых потоков.

Вторая гипотеза ставит процесс селеформирования в зависимость от величины коэффициента текучести:

$$R = \frac{\rho_{nm} - \rho_{см}}{\rho_{nm} - \rho_o}, \tag{4.22}$$

где ρ_{nm} – плотность селевой массы на пределе текучести, введенного в селеведение И. И. Херхеулидзе.

К сожалению, оценить роль величины коэффициента текучести R в селевых процессах не представилось возможным, поскольку методика определения плотности селевой массы на пределе текучести ρ_{nm} в доступных нам источниках не приведена.

Эскизная модель эрозионно-сдвигового селевого процесса, в основу которой положена гипотеза о волнообразном характере движения селей [127], описана в работе [128]. В этой модели интенсивность вовлечения грунта пропорциональна кинетической энергии движения селевой массы за вычетом потерь на вязкое трение.

Средний расход в любой точке селевого очага рассчитывается из выражения

$$Q_c(l) = Q_в\left[1 + \frac{\overline{C}(l)}{1 - (1+\zeta)\overline{C}(l)}\right], \tag{4.23}$$

где $Q_в$ – расход водного потока, м^3/с; $\overline{C}(l)$ – средняя концентрация твердого компонента в селевой массе, определяемая по данным расчета изменения плотности селевой массы по длине селевого очага.

В модели селеформирования Т. Такахаши [129, 130] развиты идеи Р. Багнольда о механизме образования селей вследствие обводнения рыхлообломочных пород, представленных осыпями. Т. Такахаши рассмотрел схемы формирования селевой массы в двух ситуациях:

рыхлообломочные породы, не обладающие сцеплением, залегают на неразрушенном основании на уклонах, близких к углам естественного откоса;

толстый слой рыхлообломочных пород (также не обладающих сцеплением) залегает на относительно небольшом уклоне.

Используя гипотезу Р. Багнольда о дисперсном напряжении, возникающем при частом соударении частиц, Т. Такахаши получил выражение для определения скорости движения, глубины фронтальной части и расхода селевых потоков.

Анализ условий формирования селей, сформулированных Р. Багнольдом, Ю. Б. Виноградовым и Т. Такахаши, а также результатов экспериментальных исследований, выполненных Т. Такахаши, позволяет сделать следующие выводы. Если селеформирующие породы имеют незначительную

дисперсию размеров частиц, а размеры последних таковы, что они не могут переноситься потоками, образующимися на поверхности рыхлообломочных пород, во взвешенном состоянии, образование и движение селей большой плотности (более 2000 кг/м^3) становится возможным лишь при углах наклона селевых очагов не менее 20–25°. Сила трения, проявляющаяся при деформации описываемой селевой массы, подчиняется закону Кулона, и лишь при относительно больших скоростях деформации, возникающих при движении селевой массы на уклонах 18–20° и более, величина нормального давления может уменьшаться за счет перехода частиц в квазивзвешенное состояние, обусловленное непрерывным соударением частиц. При выходе описываемых селей на уклоны, не обеспечивающие затраты энергии на квазивзвешивание частиц путем обмена количеством движения между ними и руслом, неизбежен частичный распад селевой массы и, как следствие, уменьшение их плотности, расхода и объема.

Механизм формирования селей в условиях, когда сосредоточенный водный поток взаимодействует с селеформирующими грунтами, обладающими значительным сцеплением, существенно отличается от описанного процесса сдвига водонасыщенных пород. Разрушение структуры грунта на границе «поток – русло» происходит постепенно и носит локальный, чешуйчатый характер, поэтому интенсивность вовлечения рыхлообломочных пород в движение в решающей мере определяется их устойчивостью к эродирующему воздействию жидкого и твердого компонентов селевой массы. Прибегая к аналогам, селевой процесс можно уподобить работе гигантского станка: в качестве обрабатываемого материала выступают породы, вмещающие русло, режущего инструмента – движущаяся селевая масса, источника энергии – потенциальная энергия потока.

Величина коэффициента «полезного» действия такого механизма (а под ним понимается отношение мощности, затрачиваемой потоком на вовлечение твердого компонента в селеформирование, к полной мощности потока) невелика и в зависимости от физико-механических свойств селевой массы, селеформирующих грунтов, морфометрии русла и характеристик потока может изменяться в широких пределах. Так, при движении водного потока в русле, выработанном в коренных породах, КПД практически равен нулю; близок он к нулю и в условиях, когда влажность селевой массы лишь незначительно отличается от влажности на пределе ее текучести даже в тех случаях, когда сцепление грунтов мало.

4.4.2. Примеры селепроявлений

Классическими примерами реализации эрозионно-сдвиговых селевых процессов могут служить явления, имевшие место при искусственном воспроизведении селей на Шамалганском полигоне в 1972–1978 гг. [131–133]. Их описание приведено в главе 5.

Малоалматинский сель 1973 г. описан в [8]. В результате просадки перемычки между двумя озерами, расположенными на современной морене ледника Туйыксу (Иле Алатау), произошло катастрофическое

опорожнение этих водоемов. Общий объем сброшенной воды оценивается в 225 тыс. $м^3$.

Взаимодействие сосредоточенного водного потока, максимальный расход которого достигал 350 $м^3/с$, с рыхлообломочными породами морен ледника Туйыксу привело к образованию селевой массы с плотностью 1400–2000 $кг/м^3$. Вследствие относительно низкой плотности селевой массы, а также незначительного содержания пылевато-глинистых фракций в составе ее твердого компонента, при движении селя по долине в урочище Мынжылки (интервал высот 3050–3150 м над уровнем моря) произошел практически полный распад селевой массы, сопровождавшийся выпадением примерно 140 тыс. $м^3$ рыхлообломочных пород на участке, расположенном выше габионной плотины (рисунок 4.3).

Рисунок 4.3. Селевые отложения выше плотины в урочище Мынжылки, образовавшиеся после распада селевой массы

Поскольку габионная плотина была рассчитана на задержание паводка (селя), объем которого не превышает 32 тыс. $м^3$, произошло разрушение плотины и водный поток устремился вниз по уступам древней морены. Взаимодействие потока с рыхлообломочными породами, вмещающими русло, привело к насыщению его твердым материалом.

На всем 8-километровом пути, который поток преодолел со средней скоростью 10–11 м/с, образовался мощный эрозионный врез глубиной 12–15 м (местами до 40 м). Плотность селевой массы, задержанной плотиной в урочище Медеу, составила 2390 $кг/м^3$, ее объем – 3,8 млн $м^3$, максимальный расход селя в створе, расположенном в 3–3,5 км выше селехранилища

в урочище Медеу, – 10 тыс. $м^3/с$ [134]. Значительное углубление русла привело к подрезке примыкающих к нему склонов. Там, где рыхлообломочные склоновые и ледниковые отложения (морена) были насыщены водой небольших притоков р. Киши Алматы, произошли сдвиги грунта, объем наибольшего из них достигал 150 тыс. $м^3$.

Основные выводы по селеформированию 1973 г. на р. Киши Алматы:

водный поток при движении на углах наклона от 8 до 14° и длине очага селеформирования, близкой к 8000 м, трансформировался в сель с плотностью 2400 $кг/м^3$, максимальный расход при этом изменялся с 350 до 10 000 $м^3/с$;

средние скорости движения жидкого и твердого компонентов в селевом потоке были одинаковы;

основная масса рыхлообломочных пород вовлечена в селеобразование в результате эрозионного воздействия потока на грунты, вмещающие русло потока.

Одним из интереснейших объектов, известных мощными селепроявлениями, является высокогорная зона бассейна р. Сарыкан (Жетысу Алатау). Там на северных склонах главного хребта на высотах 2500–3000 м над уровнем моря расположен селевой врез, характеризующийся наименьшим, по имеющимся в нашем распоряжении данным, продольным уклоном, в котором взаимодействие сосредоточенных водных потоков с грунтами неоднократно приводило к формированию мощных грязекаменных селей. Нерукотворным памятником прошедшим селям в г. Сарыкане возвышаются глыбы весом в десятки тонн.

К важнейшим данным, полученным при изучении следов прохождения селя 1982 г. на р. Сарыкан, следует отнести:

грязекаменный поток с плотностью 2300–2350 $кг/м^3$ образовался при взаимодействии сосредоточенного водного потока с грунтами древней морены на углах наклона, не превышающих 11°;

в очаге селеформирования не происходило образования отмостки, следовательно, крупные фракции перемещаются качением в составе потока со средней (или больше средней) скоростью на углах, меньших 12°, определенных как критические при изучении процессов качения в воздушной среде [115];

интенсивный процесс вовлечения рыхлообломочных пород в селеобразование происходил на углах наклона 5–7°; на участке длиной около 1200 м было вынесено около 270 000 $м^3$ грунта, плотность селевой массы на входе описанного участка, определенная балансовым способом, составляла 2200–2250 $кг/м^3$;

при движении селя на углах наклона русла 1–2° произошел частичный распад селевой массы, в результате которого в ее составе остались только те фракции твердого компонента (менее 50 мм), которые удерживались в квазивзвешенном состоянии за счет проявления свойства пластичности селевой массы.

4.5. Сдвиговый селевой процесс

Под сдвиговым селевым процессом будем понимать нарушение устойчивости обводненных рыхлообломочных пород, их разжижение и перемещение в виде грязекаменных потоков без нарушения сплошности среды. Объем и расход селей, вызванных разрушением структуры грунтов и переходом их в текучее состояние, определяются, главным образом, минералогическим и гранулометрическим составами рыхлообломочных пород, степенью их увлажнения и консолидации, морфометрическими характеристиками рельефа местности. Ареной развития сдвиговых селевых явлений могут служить как отрицательные, так и положительные формы рельефа, ибо в некоторых ситуациях относительно большее увлажнение грунта в отрицательных формах рельефа может компенсироваться большими уклонами положительных форм.

Сдвиг рыхлообломочных пород происходит под действием силы тяжести; рост напряжения сдвига может быть обусловлен заполнением порового пространства грунтовой водой или суспензией, изменением размера массива рыхлообломочных пород, в частности их мощности. В определенных ситуациях существенную роль в сдвиге играет увеличение в грунтах порового давления.

К факторам, благоприятствующим сдвигу, следует отнести подрезку склонов водными и селевыми потоками, суффозионные явления, изменение физико-механических характеристик грунтов во времени.

Факторами, препятствующими сдвигу, являются кулоновское трение, сцепление (обусловленное наличием в составе рыхлообломочных пород глинистых или других цементирующих частиц), а также промерзание пород, зацепление, влияние которого особенно заметно, когда мощность сдвигаемых пород соизмерима с размерами максимальных частиц, входящих в состав грунтов, корневая система деревьев и другой растительности. Важным фактором, препятствующим сдвигу относительно тонких слоев грунтов, служат силы капиллярного притяжения.

Элементами рельефа, на которых развиваются сдвиговые селевые процессы, являются:

склоны, сложенные рыхлообломочными породами;

ложбины в коренных породах;

ложбины на залесенных и задернованных склонах;

уступы морен.

4.5.1. Склоны, сложенные рыхлообломочными породами

Рыхлые грунты состоят из скоплений частиц различных размеров. Устойчивость склонов, представленных такими скоплениями, зависит от трения между частицами и сил сцепления. Предельное сдвигающее напряжение в таких породах может быть определено с помощью уравнения Кулона:

$$\tau = \sigma tg\varphi + C_{гр}, \tag{4.24}$$

где σ – нормальное напряжение, Н/м^2; φ – угол внутреннего трения исследуемой породы; $C_{гр}$ – сцепление, Н/м^2.

При отсутствии в породах глинистых и других цементирующих частиц $C_{гр}$=0, в этом случае φ называют углом естественного откоса; равенство углов внутреннего трения и естественного откоса справедливо лишь в случаях, когда сопротивление сдвигу определяется только трением по поверхности частиц.

Угол естественного откоса зависит от формы и минералогического состава частиц [135], для песка φ=33°, лёсса и мергелей – 25°, сланца 26–29°, известняка – 32°, гнейса – 34°, сиенита и гранита – 35–40°. Весьма незначительны углы внутреннего трения у глин [84]. В условиях разрушения структурных связей для монтмориллонитовой глины φ=4–10°, для каолинитовых и гидрослюдистых глин φ=10–28°. Низкие значения углов внутреннего трения объясняют отсутствием непосредственного контакта между твердыми частицами из-за наличия у последних пленок связанной воды.

Величина сцепления $C_{гр}$, обусловленного водно-коллоидными обратимыми связями, изменяется от значений, близких к нулю в очень влажных глинах, до 10 Н/м^2 в высушенной воздухом глине [135]. Обводнение рыхлообломочных пород приводит к существенному уменьшению углов, на которых склоны теряют свою устойчивость. Причиной тому является возрастание сдвигающей силы за счет воды, заполняющей поровое пространство, и уменьшения нормального давления в результате проявления архимедовой силы, действующей на частицы, погруженные в воду. Увлажнение грунта резко снижает его прочностные свойства из-за падения сцепления, обусловленного наличием в составе пород пылевато-глинистых частиц.

Если мощность сдвигаемого слоя незначительна (доли, первые единицы метра), важную роль начинают играть капиллярные силы [136]. Последние, как известно, обусловлены взаимодействием свободной воды с поверхностями частиц, образующих капилляры. Напомним, что интенсивность распределения движущей силы по поверхности мениска в случае его круглого сечения равна

$$u = \frac{2\alpha}{R}, \tag{4.25}$$

где α – постоянная, определяемая взаимодействием воды с веществом, образующим капилляры; R – радиус кривизны мениска.

Минимальное значение радиуса кривизны мениска R ограничивается толщиной адсорбционных пленок, препятствующих продвижению свободной воды [88]. Капиллярные силы прижимают минеральные частицы друг к другу, образуя тем самым механически связанные системы.

Удерживающее напряжение с учетом действия капиллярных сил записывается в виде

$$\sigma(-) = \sigma_g + \sigma_c + \sigma_k, \tag{4.26}$$

где σ_g, σ_c, σ_k – соответственно напряжения, обусловленные действием гравитационного притяжения, поверхностного напряжения, капиллярного притяжения.

Влияние капиллярных сил на процессы сдвига наиболее просто определяется экспериментальным путем. Применительно к описанию сдвигового селевого процесса капиллярные силы проявляются в следующих ситуациях:

1. Вода в виде дождя поступает на поверхность рыхлообломочных пород, находящихся в воздушно-сухом состоянии. В этом случае под действием в основном капиллярных сил она проникает в толщу породы, сжимая слой последней, в которой происходит фильтрация. Если скорость фильтрации больше интенсивности осадков, мениски образуются на обеих сторонах капилляров.

2. Вода в виде дождя большой интенсивности или сосредоточенного водного потока перекрывает всю поверхность рыхлообломочных пород, в такой ситуации мениски образуются только с одной стороны капилляров (вогнутость капилляров направлена вниз), капиллярные силы сжимают слой породы, находящийся между водной поверхностью и поверхностью, образованной менисками.

3. Вода в виде дождя поступает на поверхность рыхлообломочных пород, мощность которых ограничена водоупором, в зависимости от интенсивности осадков образуются один или два мениска у каждого капилляра; после того как вода в капиллярах достигнет водоупора, по мере дальнейшего поступления осадков кривизна менисков будет снижаться, при этом сжимающая сила также уменьшается вплоть до полного исчезновения.

4. Вода в виде сосредоточенного потока течет по водоупору, смоченный слой под действием капиллярных сил прижимается к водной поверхности; высота поднятия капиллярной воды, а следовательно, сжимающая сила определяется характеристиками капилляров.

Прежде чем приступить к оценке роли капиллярных сил в процессах селеформирования, приведем результаты экспериментов по сдвигу блоков рыхлообломочных пород, проведенных при различных условиях их увлажнения. В качестве образцов рыхлообломочных пород использовались отмытый песок (его гранулометрический состав приведен в таблице 4.2) и селевые отложения на р. Улькен Алматы (максимальный размер частиц был ограничен 10 мм).

Таблица 4.2. Гранулометрический состав отмытого песка

Фракции, мм	0,5-1	0,25-0,5	0,1-0,25	0,1-0,01
Содержание, %	4,7	75,8	18,3	1,2

Величины напряжений, при которых происходил сдвиг блока, представленного песком или селевыми отложениями, приведены в таблице 4.3.

Из приведенных данных следует, что капиллярное смачивание приводит к значительному увеличению напряжения сдвига по сравнению с воздушно-сухим состоянием грунта, напряжение сдвига существенно умень-

Таблица 4.3. Зависимость предельного напряжения сдвига селевой массы от состава и состояния грунта

Состояние грунта	Предельное напряжение сдвига селевой массы, Н/м^2	
	песок (плотность 1600 кг/м^3)	селевые отложения (плотность 1570 кг/м^3)
Воздушно-сухой	650	1640
Капиллярно-смоченный	2900	3100
Поры до плоскости сдвига заполнены водой	1050	590
Образец под водой	440	420

шается в условиях затопления грунта водой. Роль капиллярных сил проявляется особенно ярко в условиях, когда толщина слоя, сдвиг которого мы можем ожидать, невелика. Такие условия реализуются в очагах рассредоточенного селеформирования. Селевые процессы развиваются в них, как правило, при выпадении интенсивных осадков. Особенностью очагов рассредоточенного селеформирования является предварительное накопление рыхлообломочных пород в микроручейковой сети, рытвинах и других отрицательных формах рельефа. Ход селевого процесса в решающей мере определяется распределением интенсивности осадков в ходе дождя, важную роль играет и предварительное увлажнение.

Рассмотрим некоторые ситуации, возникающие в период, предшествующий образованию селя, а также механизм вовлечения рыхлообломочных пород в селеформирование.

Если грунт находится в воздушно-сухом состоянии, а интенсивность осадков меньше скорости фильтрации, сдвиг пород невозможен. Однако может случиться, что интенсивность осадков превышает скорость фильтрации на стокообразующих площадках, вследствие чего будут иметь место плоскостной смыв пород и концентрация воды в микроручейковой сети. До тех пор, пока не произойдет заполнение капиллярной сети водой, сдвиг пород в отрицательных формах рельефа маловероятен, вовлечение рыхлообломочного материала в селевой процесс будет осуществляться с поверхности массива, т.е. будет развиваться эрозионно-сдвиговый селевой процесс. Последний имеет место в условиях, когда интенсивность осадков превышает скорость фильтрации в породах, заполняющих отрицательные формы рельефа настолько, что верхние мениски капилляров не образуются.

Вопрос о возможности перехода эрозионно-сдвигового селевого процесса в сдвиговый решается исходя из соотношения величин скорости фильтрации и скорости эрозионного размыва ПСМ. В реальных условиях в подавляющем большинстве случаев скорость эрозионного размыва превышает скорость фильтрации для одних и тех же пород.

Совершенно иная ситуация возникает в условиях, когда рыхлообломочные породы предварительно увлажнены. Причиной тому могут служить снеготаяние, затяжные дожди с малой интенсивностью. Выпадение дождей может привести к полному заполнению пор водой и, как следствие,

исчезновению капиллярных сил; это способствует резкому уменьшению удерживающего напряжения и массовому сдвигу горных пород, насыщенных влагой. Поскольку вода в породе накапливалась длительное время, расход селевых потоков может быть совершенно не связан с характеристиками дождей, их вызвавшими, и может носить катастрофический характер.

Анализ геологических, геоморфологических и метеорологических условий селеформирования в Чуст-Папских адырах (Ферганская долина) позволил сделать вывод о возможности образования селей большой плотности (около 2000 кг/м^3) в данном районе в результате массового сдвига слоя продуктов выветривания пород, слагающих адыры. Его мощность в среднем составляет 10–15 см, а объемный вес (по данным экспедиционных работ КазНИГМИ) – 1300–1400 кг/м^3 (при объемном весе материнских пород 1982 кг/м^3).

В обычных условиях в Чуст-Папских адырах формируются наносоводные потоки, так как запасы рыхлообломочных пород в микроручейковой сети весьма незначительны, а устойчивость материнских пород к эрозии велика. Обычно насыщение водой реголита приводит лишь к частичному сдвигу выветрелых пород, однако в процентном отношении эта площадь невелика (доли процента). Нетрудно представить ситуацию, при которой сдвиг реголита может носить массовый характер. Для этого необходимо предварительное его увлажнение, а затем выпадение осадков с интенсивностью, превышающей скорость фильтрации в слое продуктов выветривания. Исчезновение капиллярного связывания грунтовых частиц приводит к практически одновременному сдвигу реголита и образованию грязекаменных (грязевых) потоков в адырной зоне.

По утверждению местных жителей, мощные селевые явления имеют место в описываемом районе один раз в 20–25 лет, а ливни выпадают достаточно часто. То обстоятельство, что выпадение ливней далеко не всегда приводит к формированию селей большой плотности, позволяет сделать вывод о малой вероятности выпадения ливней в условиях предварительного увлажнения чехла выветрелых пород Чуст-Папских адыров.

Сдвиг водонасыщенных рыхлообломочных отложений на склонах гор происходит, как правило, синхронно с выпадением выдающихся по интенсивности и продолжительности осадков, реже спустя несколько часов после прекращения ливней. Важным фактором, способствующим сдвигам, является уменьшение устойчивости склонов, обусловленное промоинами, образовавшимися в результате концентрации поверхностного дождевого стока.

Если устойчивость откоса промоины определяется кулоновским трением и наличием сцепления, нетрудно показать [135], что критическая высота откоса

$$h_c = \frac{C_{гр}}{\rho g}. \qquad (4.27)$$

В реальных ситуациях критическая высота откоса будет несколько меньше из-за того, что в приведенной схеме расчета не учитывается продольный угол наклона промоины.

Типичным примером селеформирования в результате сдвига склоновых отложений служат процессы, имевшие место на склонах хр. Хамар-Дабана 25–27 июля 1971 г. Средние морфометрические характеристики типичных селевых очагов хр. Хамар-Дабана таковы: длина – 200–400 м, ширина – 80–200 м, глубина – 2–3 м, уклон – 22–25° [18].

При обследовании селевых очагов руч. Галанского практически везде наблюдались остатки промоин, образовавшихся в результате концентрации поверхностного стока и выклинивания грунтовых вод.

4.5.2. Ложбины в коренных породах

Формирование селей в ложбинах, выполненных в коренных породах, рассмотрим на примере селевых бассейнов р. Дуруджи (южный склон Главного Кавказского хребта, примыкающий к Алазанской долине) [40]. Очаги селеобразования представляют собой ложбины, в которых накапливается рыхлообломочный материал, поступающий с прилегающих к ним склонов. Относительное превышение склонов над очагами – 500–1200 м, крутизна склонов – 30–60° и более. Основными поставщиками рыхлообломочного материала являются небольшие, но многочисленные оползни, осыпи; часть мелких фракций поступает в составе временных водных потоков, лавин и т.д. Минералогический состав пород – глинистые сланцы, незначительную долю составляют песчаники. Гранулометрический состав: глины – 3–4 %, пыль – 16–18 %, песок – 10–15 %, остальная часть приходится на фракции более одного миллиметра.

Процесс накопления материала начинается после очередного селевого явления, в результате которого практически весь рыхлообломочный массив, накопившийся ранее, выносится за пределы ложбины. В первой стадии накопления, когда мощность отложений невелика, рыхлообломочный материал характеризуется большими значениями пористости и угла внутреннего трения. По мере возрастания мощности отложений, вследствие чего вероятность выноса мелких фракций уменьшается, поры заполняются упомянутыми фракциями. Трансформация гранулометрического состава рыхлообломочных отложений, обусловленная процессами физико-химического выветривания, взаимодействия воды с пылевато-глинистыми фракциями, сопровождающегося увеличением объемов смеси, заполняющих поровое пространство, образуемое относительно крупными частицами, приводит к расклиниванию этих частиц, уменьшению числа жестких контактов между ними. Благодаря этому, а также взвешивающему воздействию (архимедова сила) образующейся вязкопластической среды, заполняющей поровое пространство, на относительно крупные частицы угол внутреннего трения образующейся смеси уменьшается. Создаются предпосылки для локальных деформаций массивов; в свою очередь, результатом деформаций является разуплотнение массивов (увеличение пористости) и,

как следствие, увеличение кулоновского трения. Последнее приводит к прекращению деформаций.

Со временем образовавшиеся при деформациях поры заполняются тонкодисперсными фракциями. Вновь происходят деформации и т.д. до тех пор, пока не создадутся условия, при которых нарушение устойчивости массивов сопровождается переходом водонасыщенных масс в текучее состояние.

К факторам, способствующим формированию селей, относятся сейсмические воздействия, заполнение порового пространства водой дождевых паводков, увеличение сдвигающих напряжений за счет перегрузки дополнительными порциями водно-грунтовых смесей, не приводящей к пропорциональному возрастанию сил сопротивления сдвигу, имеющих кулоновскую природу.

В работе [41] показано, что трансформация свойств селеформирующих пород заканчивается, когда мощность отложений достигает критических значений.

$$H_o = \frac{\tau_{o_c} - B}{A}\left[1 + \frac{\alpha B}{\left(\alpha + \frac{\tau_{o_c} B}{A}\right)\left(\tau_{o_c} - B\right)}\right], \tag{4.28}$$

где τ_{0c} – предельное динамическое касательное напряжение сдвига селевой массы, г/см^2.

$$\tau_{o_c} = \tau_{o_{гр}} \lambda^{-m}, \tag{4.29}$$

$$m = 1 + 0{,}49\left(\frac{\gamma_н}{\gamma_{гр}}\right)^{3{,}5}, \tag{4.30}$$

где $\gamma_н$, $\gamma_{гр}$ – удельный вес минеральных частиц и жидкого (грязевого) компонента селевой массы, г/см^3; $\tau_{0гр}$ – предельное динамическое касательное напряжение сдвига жидкого (грязевого) компонента селевой массы, г/см^2.

По наблюдениям Г. М. Беручашвили [40], нарушение устойчивости «первичной селевой массы» начинается с обрушения фронтальной части массива, этот процесс распространяется вверх со скоростью

$$C_в = \left\{ gH + C^2\varphi + \left(g\Delta t\right)^2\left[\sin\alpha\left(1 - \frac{tg\varphi}{tg\alpha}\right) - \frac{\tau_{o_c}}{\gamma_c R}\right]^2 - \right.$$
$$\left. - g\Delta t\left[\sin\alpha\left(1 - \frac{tg\varphi}{tg\alpha}\right) - \frac{\tau_{o_c}}{\gamma_c R}\right]\right\}^{0,5}, \tag{4.31}$$

где Δt – промежуток времени, равный 1 с; R – гидравлический радиус, м.

Уравнения (4.28) и (4.31) получены в результате обработки и анализа эмпирического материала, поскольку «... теоретическое рассмотрение изучаемого явления ... не приводит к практически обозримым результатам» [41].

Оценивать расход селей, формирующихся при сдвиговых явлениях в скальных ложбинах, можно по формуле (при $B>3H$)

$$Q_{\max} = 0,75BH^{\frac{3}{2}}\left[7\left(1+4\sin\alpha\right)-80f\cos\alpha-\frac{8\tau_{см}}{\rho_{см}}\right]^{0,5}, \qquad (4.32)$$

полученной путем решения уравнения баланса энергии с использованием данных моделирования, носивших качественный характер.

Расход селей, определяемый уравнением (4.32), является максимально возможным лишь в случаях, когда нарушение устойчивости масс, накопленных в скальных ложбинах, происходит постепенно путем последовательного во времени и пространстве обрушения фронтальных зон накоплений. Возможны ситуации, когда в результате землетрясений рыхлообломочные массы, заполняющие ложбины, практически мгновенно переходят в текучее состояние. Существует мнение [41], что «... даже при мгновенном переходе всего объема селевой массы, залегающей в очаге, в состояние текучести, мгновенное обрушение равновесия всего объема и его одновременное сползание не имеют место».

Приведенный вывод, по нашему мнению, верен лишь отчасти. По сценарию, когда «... опорожнение очага происходит постепенно ...», путем «... обрушения некоторого объема в нижней фронтальной части залегающей первичной массы ...» [41], события развиваются лишь при практически горизонтальной поверхности отложений в очагах селеформирования. При определенных реологических свойствах селевой массы, образующейся в результате сейсмического воздействия на водонасыщенные грунты, и углах наклона поверхности отложений возникают условия для синхронного сдвига всей накопившейся рыхлообломочной массы. Режим движения определяется морфометрическими характеристиками ложбины и сдвинувшегося массива, свойствами селевой массы.

Интересные результаты получены нами при оценке устойчивости к сдвигу грунтов при различных условиях их водонасыщения, а также при воздействии на них сейсмических волн.

На рисунке 4.4 схематично показаны крайние ситуации возникновения селей в скальных ложбинах: первая (рисунок 4.4, *а*), когда поверхность отложений горизонтальна, вторая (рисунок 4.4, *б*) соответствует наклонной поверхности отложений.

Характер перехода водонасыщенного грунта в текучее состояние при горизонтальной поверхности отложений «первичной» массы зависит от природы сил, препятствующих деформации грунта. Если кулоновское трение проявляется ощутимо, течение грунта начинается с фронтальной зоны в результате последовательного сдвига блоков. В ситуации, когда наклон поверхности отложений близок к таковому скальных ложбин, а роль кулоновского трения пренебрежимо мала, переход массы в текучее состояние сопровождается единовременной деформацией всего объема отложений.

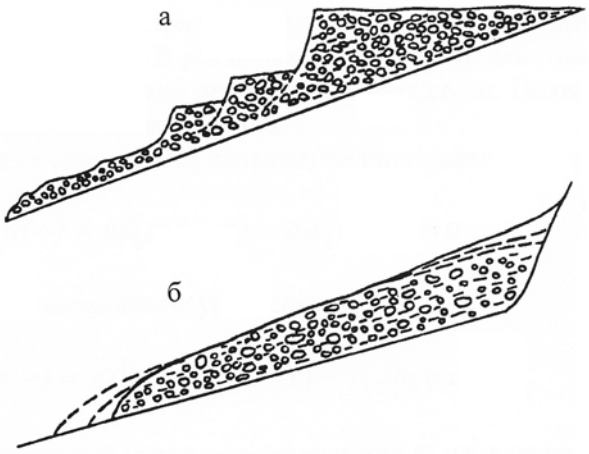


Рисунок 4.4. Схема сдвижения водонасыщенных грунтов в скальных ложбинах:
а – нарушение устойчивости путем обрушения фронтальных зон отложений;
б – сдвиг всей толщи накоплений в результате перехода в текучее состояние

4.5.3. Уступы морен

Благоприятное сочетание факторов, способствующих проявлению сдвиговых селевых процессов, наиболее часто встречается на современных моренах. К ним относятся большие уклоны, сильная увлажненность рыхлообломочных пород, залегающих, как правило, на ледяных толщах, непрерывные колебания температуры, приводящие к перераспределению гранулометрического состава рыхлообломочных пород в активной зоне, воздействие фильтрационного давления.

Особенность перераспределения гранулометрического состава пород заключается в обводнении области, примыкающей к подстилающей поверхности (она может быть представлена льдом либо вечной мерзлотой), крупными фракциями вследствие периодического замерзания и оттаивания активной зоны. Это приводит к практически полному исчезновению зацепления и уменьшению кулоновского трения за счет образования между каркасом из частиц и подстилающей поверхностью слоя, обладающего ярко выраженным свойством пластичности. Спусковым механизмом в таких ситуациях является увеличение температуры окружающей среды, достаточной для оттаивания пограничного слоя.

В определенных условиях решающим фактором возникновения сдвиговых явлений становится фильтрационное давление, возникающее при напорном движении воды в грунте. В реальных ситуациях его действие, как правило, направлено противоположно действию силы тяжести. Поэтому грунт испытывает фильтрационное взвешивание.

В таких условиях сдвигающее напряжение описывается уравнением

$$\sigma(+) = gZ\left[\rho(1-\varepsilon)+\rho_o\varepsilon\right]\cos\alpha\sin\alpha\,, \qquad (4.33)$$

а удерживающее напряжение –

$$\sigma(-) = gZ\left[(\rho - \rho_o)(1-\varepsilon) - \rho_o J\right] tg\varphi \cos^2\alpha\,, \qquad (4.34)$$

где J – гидравлический уклон, характеризующий изменение напора (в направлении, нормальном к плоскости залегания грунта) на единицу длины.

Сдвиговые явления на современных моренах характеризуются в основном незначительными расходом и объемом. Их объемы колеблются от первых сотен до нескольких десятков тысяч кубометров. Незначительное содержание в породах современных морен пылевато-глинистых фракций сказывается на физико-механических свойствах образующейся селевой массы. Характерные для последних большие углы внутреннего трения и скорости распада обусловливают незначительные дальности селевых выбросов. Если процессы сдвига не сопровождаются выбросом значительных масс воды из полостей моренно-ледникового комплекса, формирующиеся сели редко выходят за пределы гляциально-нивальной зоны.

Формирование селей в результате сдвига водонасыщенных пород, образующих древние морены, гораздо более редкое явление. Их причиной является аномальное увлажнение грунтов либо изменение условий фильтрации в теле морен. Благоприятствующим фактором может явиться и подрезка склонов морен водными и селевыми потоками.

Значительно большее, по сравнению с грунтами современных морен, содержание пылевато-глинистых частиц в породах древних морен качественно изменяет реологические свойства селевой массы. При относительно большой их плотности (2300–2400 кг/м^3 и более) превалирующую роль в сопротивлении деформации начинают играть вязкопластические свойства селевой массы; трение, имеющее кулоновскую природу, может уменьшаться до пренебрежимо малых значений; скорость распада определяется процессами коагуляции глинистых частиц. Объем формирующихся селей, их расход благоприятствуют выносу рыхлообломочной породы далеко за пределы селевых очагов.

Учитывая сказанное, а также то обстоятельство, что в результате сдвиговых процессов на древних моренах могут формироваться сели с объемом в несколько миллионов кубометров, вопросы мелиорации древних морен должны постоянно находиться в поле зрения подразделений, отвечающих за безопасное функционирование народнохозяйственных объектов, жизнь и здоровье людей в зонах, подверженных воздействию селей [137].

Классическим примером обсуждаемых явлений, по нашему мнению, служат процессы, имевшие место 6 июля 1958 г. в верховьях р. Жарсай (бассейн р. Есик, Иле Алатау). Сопоставление свидетельств очевидцев прохождения селя, находившихся, к сожалению, на относительно большом (несколько километров) расстоянии от очагов селеобразования, анализ фотоматериалов и данных полевых исследований на Жарсайском моренно-ледниковом комплексе позволяют с достаточно высокой достоверностью восстановить события 1958 г.

Взаимодействие водного потока, образовавшегося в результате прорыва ледникового озера, с рыхлообломочными породами древней морены привело к формированию селя в правом селевом очаге. Из-за вовлечения грунта в селеформирование произошло углубление русла р. Жарсай, примыкающего к основанию уступа морены. Селевые явления эрозионно-сдвигового генезиса закончились к 21 ч 6 июля. В процессе прорыва озера часть воды попала в подземные пути фильтрации талых вод, значительная доля которых в виде концентрированных потоков выклинивалась в районе образования (в последующем) левой селевой воронки. Поскольку фильтрационные каналы сформировались на бытовых расходах, поступление дополнительной воды неизбежно привело к повышению порового давления, дополнительному насыщению грунта водой.

Следствием изменения морфометрической и гидрогеологической ситуаций явилась потеря устойчивости массивом, объем которого составлял около 2 млн $м^3$. Степень увлажнения рыхлообломочных пород морены оказалась достаточной для перехода грунта после разрушения его структуры в текучее состояние. Расход селя, образовавшегося в результате сдвига, превысил, по оценке очевидцев, таковой, обусловленный предшествующим эрозионно-сдвиговым селевым процессом.

Заполнение озерной котловины и прорыв образующихся озер на Жарсайской морене имели место в 1963 и 1977 гг. В 1963 г. селевой процесс развивался в правом очаге и долине р. Есик. Возникшие при вхождении селевого вала в озеро Есик волны, повышение в нем уровня воды вследствие заполнения озерной чаши селевой массой привели к значительному увеличению расхода воды, вытекавшей из озера. Это послужило причиной разрушения перемычки завала, образовавшегося в результате землетрясения, произошедшего около 15–20 тыс. лет назад, и уничтожения озера [21, 27, 39].

Своевременные меры по регулируемому опорожнению моренного озера на леднике Жарсай в 1977 г. предотвратили формирование селя, по своим характеристикам идентичного селю 1963 г. [28].

4.5.4. Ложбины на задернованных и залесенных склонах

Особенностью очагов селеформирования в ложбинах на задернованных и залесенных склонах является их приуроченность к деятельному слою, т.е. слою почвы (включая растительность), тепловое состояние которого обусловливается процессами тепло- и влагообмена с атмосферой, радиационными процессами, а в области вечной мерзлоты ежегодно промерзающему зимой и оттаивающему летом. Мощность деятельного слоя определяется составом пород, экспозицией склонов, характером растительности и в зависимости от климатических условий может изменяться от долей до нескольких метров. В процессе жизнедеятельности этого слоя в нем происходят важные с точки зрения создания условий, благоприятствующих селепроявлениям, изменения. Рост и отмирание корневой системы трав, кустарников и деревьев приводят к образованию каналов фильтрации и стока

талых и дождевых вод, развитию суффозионных процессов. В результате сезонного промерзания и оттаивания деятельного слоя происходит перераспределение гранулометрического состава грунтов: крупные частицы перемещаются в верхние горизонты, пограничный слой обогащается пылевато-глинистыми фракциями. Это ведет к уменьшению зацепления, а главное, практически полному, при определенных условиях, исчезновению кулоновского трения – основного фактора, препятствующего проявлению сдвиговых селевых процессов.

Следует учитывать и то обстоятельство, что растительность, в том числе и деревья, в районах вечной мерзлоты является скорее дестабилизирующим фактором, нежели способствующим закреплению склонов, ибо корневая система развивается только в пределах деятельного слоя. Изменение пространственной ориентировки блоков грунта даже при небольших подвижках склонов провоцирует массовое падение деревьев, образующиеся на месте комлей ямы и пустоты заполняются водой, увеличивая сдвигающие силы и уменьшая сцепление в грунте.

Массовые селевые явления в ложбинах на задернованных или залесенных склонах наблюдаются во время выпадения выдающихся по интенсивности и слою дождях. Не помещаясь в деятельном слое, вода в виде поверхностного стока концентрируется в притальвежных зонах ложбин, размывая грунт и образуя при этом промоины, глубина которых соизмерима с мощностью деятельного слоя. Подрезка бортов ложбин приводит к потере устойчивости их бортов, а затем и склонов, прилегающих к ложбинам. На крутопадающих участках сдвиг водонасыщенных грунтов происходит и без образования промоин.

Отдельно взятые сдвиговые процессы в упомянутых ложбинах не представляют серьезной угрозы хозяйственной деятельности; однако массовые синхронные селеформирования в бассейнах рек, бытовой расход которых от единиц до нескольких десятков кубометров в секунду, коренным образом изменяют ситуацию. При слиянии селевых потоков с речными водами степень разжижения селевой массы не достигает порога, за которым начинается ее частичный распад. Наоборот, поток обогащается русловыми отложениями, накопившимися в межселевой период; тем самым увеличиваются расход и объем селя. После окончания основных сдвиговых явлений на тех же участках в течение ряда лет возможны незначительные селеформирования; со временем склоны зарастают растительностью и вновь начинается процесс образования почвенного слоя, который через десятки, а быть может, сотни лет во время выдающихся дождей предстанет в качестве твердого компонента селевой массы.

Типичным районом проявления сдвиговых селевых явлений в ложбинах на залесенных склонах является хр. Хамар-Дабан. Мощные сели, формирующиеся в речных бассейнах этого хребта, впадают в озеро Байкал. Селевые очаги подобного типа встречаются на Кавказе, в Средней Азии, Карпатах, на Витимском нагорье [18].

Сдвиговые селевые явления широко распространены в горных районах СНГ. Ежегодный ущерб, наносимый ими, составляет десятки миллиардов

рублей. Однако, несмотря на то, что математическое описание условий их зарождения не вызывает принципиальных затруднений, прогнозирование селей обсуждаемого генезиса остается нерешенной задачей.

Главными причинами сложившегося положения являются:

чрезвычайно большое число объектов, геологические и морфометрические характеристики которых благоприятствуют развитию сдвиговых процессов;

практически полное отсутствие информации об условиях увлажнения рыхлообломочных пород, геологическом строении потенциально опасных объектов.

Отсутствие упомянутой информации обусловлено высокой стоимостью современных геофизических исследований, осуществляемых в целях выяснения гидрогеологической ситуации в селеопасных районах. Поскольку предпосылки для резкого снижения стоимости наземных геофизических исследований в настоящее время отсутствуют, основная надежда на получение информации, необходимой для прогнозирования сдвиговых явлений, возлагается на аэрокосмические наблюдения за влажностью земной поверхности, ее геолого-геоморфологическим строением. Развитию этих наблюдений уделяется сегодня большое внимание.

4.6. Постселевые явления

Выход селей большой плотности в долины сопровождается практически полным изменением морфометрических характеристик русел временных и постоянных водотоков. По существу после окончания селевых процессов формирование упомянутых русел начинается заново: может измениться положение русел в плане, их глубина и т.д. Причем, если отмеченные морфометрические особенности русел формируются в основном в первые часы (при наличии в долине водотоков с расходом более кубометра в секунду) по завершении активной фазы селевых явлений, то характеристики шероховатости могут претерпевать серьезные изменения на протяжении нескольких дней и даже месяцев. Связано это с постепенным выносом из селевых отложений частиц, которые водный поток в состоянии транспортировать во взвешенном состоянии, путем сальтации, перекатывания или скольжения, т.е. образованием отмостки.

Объем твердого компонента, выносимого водным потоком в период образования отмостки, можно оценить с помощью выражения

$$W = 1{,}5LBC_{*}P_{>co}\overline{d}\,, \qquad (4.35)$$

где L – длина русла водотока, подвергнувшегося воздействию селя, м; B – ширина русла, м; C_{*} – концентрация твердого компонента в селевых отложениях; $P_{>co}$ – содержание частиц, принимающих участие в образовании отмостки, в полном гранулометрическом составе твердого компонента селевых отложений, %; $\overline{d}$ – средневзвешенный размер частиц, мм.

Массовый перенос частиц наблюдается даже в тех случаях, когда селевые процессы не приводят к существенной деформации речных русел.

Типичным примером могут служить постселевые явления, наблюдающиеся в бассейне р. Шамалган (Иле Алатау) после воспроизведения искусственных селей, имевших незначительные расходы.

Смешение селя с водным потоком приводит к разжижению селевой массы и, как следствие, ее частичному распаду. Перенос потоком крупных фракций, опустившихся на дно при частичном распаде селевой массы, занимает продолжительное время. Из наиболее крупных частиц, которые поток не в состоянии перемещать, переформируется отмостка русла. Остальные частицы путем сальтации, качения и скольжения медленно перемещаются вниз по течению реки. Перенос этих частиц осуществляется в составе компактных массивов, полностью изменяющих морфометрические характеристики русел. Продольный профиль русла приобретает ярко выраженный ступенчатый характер. Влекомые частицы не только заполняют углубления в отмостке русла, но и образуют слой толщиной 20–25 см, имеющий четкие границы фронтальной и тыловой зон массивов. Перемещение частиц в массиве напоминает движение гусеницы трактора.

Некоторые представления о количественных характеристиках переноса частиц в постселевой период можно получить по данным наблюдений, выполненных КазНИГМИ в период проведения Казселезащитой в 1988 г. эксперимента по воспроизведению искусственного селя.

Измерительные створы находились на расстоянии 3,5–5 км от конца нижнего селевого очага [131]. Поскольку расход селя 1988 г. из-за дефицита притока воды в водохранилище и неисправности одного из двух затворов плотины был на выходе из нижнего селевого очага незначителен (в пределах первого десятка кубометра в секунду), слияние его с водотоками, общий расход в которых составлял 1,5–2 $м^3$/с, привело к практически полному распаду селевой массы на первых сотнях метров ее движения в долине р. Шамалган.

Водный расход паводочной волны, образовавшейся в результате распада селевой массы, в первом измерительном створе, находящемся в районе поперечного створа №90 (схема расположения поперечников приведена в [131]), составил 3–3,5 $м^3$/с; расход взвешенных наносов, гранулометрический состав которых представлен в таблице 4.4 (1–12 строки), был близок к 20–25 кг/с. Влекомые наносы в паводочной волне практически отсутствовали. Изменение мутности во времени приведено в таблице 4.5.

На следующий после эксперимента день, примерно в 2 км от места слияния селя с водным потоком, в русле реки был обнаружен массив влекомых наносов, имевший следующие характеристики: длина – от 500 до 700 м, ширина – от 5 до 7 м, толщина – от 0,25 до 0,3 м. Гранулометрический состав влекомых наносов представлен в таблице 4.4 (строки 13–14). Скорость движения фронта массива оценена в 0,5–2 см/с и, следовательно, расход влекомых наносов составил 30–50 кг/с.

Движение массивов влекомых наносов длиной в несколько километров в постселевые периоды наблюдалось и при проведении экспериментов на Шамалганском полигоне в 1972–1978 гг.; подобными наносами были заполнены и барражи на р. Улькен Алматы в 1988 г.

Таким образом, при прогнозировании последствий прохождения селей необходимо учитывать и влияние постселевых явлений, в результате которых в зоны хозяйственной деятельности могут выноситься значительные (десятки тысяч кубометров) объемы рыхлообломочных пород через несколько дней, а порой и недель после окончания собственно селевых процессов.

Таблица 4.4. Гранулометрический состав взвешенных (1–12) и влекомых (13–14) наносов

№ пробы	Содержание частиц (в % по массе) с диаметром, мм										
	20-10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	<0,005
1	-	-	-	-	-	-	100	Пипеточный анализ не проводился			
2	-	-	-	0,06	0,04	-	1,03	-	-	-	98,87
3	-	-	-	-	-	0,03	0,05	0,42	1,69	0,35	97,46
4	-	-	-	0,01	0,06	0,6	0,05	0,04	5,97	1,23	92,04
5	-	-	-	-	-	-	0,05	0,44	6,1	0,86	92,55
6	-	-	-	-	0,01	0,01	0,02	1,26	3,66	1,03	94,02
7	-	-	-	-	-	98,90	1,10	Пипеточный анализ не проводился			
8	-	-	-	-	-	-	0,03	0,3	2,01	0,25	97,41
9	-	-	-	-	-	-	100	Пипеточный анализ не проводился			
10	-	-	-	-	0,01	0,02	0,04	0,26	3,19	0,94	95,54
11							100	Пипеточный анализ не проводился			
12							100	Пипеточный анализ не проводился			
13	4,27	16,06	44,49	22,52	10,58	1,56	0,53	-	-	-	-
14	13,00	18,10	41,70	19,20	6,30	1,3	0,4	-	-	-	-

Таблица 4.5. Изменение мутности постселевого паводка

№ пробы	Время отбора пробы, ч, мин	Плотность, г/см^3	Мутность, г/м^3
1	14,52	1,0462	4623
2	14,57	1,0746	7460
3	15,02	1,0538	5375
4	15,07	1,0860	8595
5	15,12	1,0949	9489
6	15,22	1,0826	8356
7	15,32	1,0836	8358
8	15,42	1,0845	8446
9	15,52	1,0894	8938
10	16,05	1,0801	8008
11	17,12	1,0728	7276

Глава 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЛЕЙ

Под моделированием селей понимают изучение селевых процессов и явлений на моделях в целях объяснения их природы и предсказания их трансформации при изменении характеристик основных факторов селеобразования. Как и при исследовании других объектов познания, при изучении селей могут использоваться различные виды моделирования: физическое, математическое, мысленное, логическое, словесное и т.д. Хотя к настоящему времени исследования в области динамики селей относительно широко развиты, тем не менее сложность научных проблем не позволила еще установить единство путей и методов изучения и решения основных вопросов.

Математическое моделирование селей осложняется тем, что в наиболее интересных с научной и практической точек зрения ситуациях возможность применения математического аппарата, применяемого в гидравлике и гидромеханике, не может быть в принципе использована из-за того, что размеры частиц твердого компонента селевой массы соизмеримы (и даже могут превышать) с глубиной потока. Это не позволяет считать, что характеристики данного элементарного объема потока будут одинаковыми для всех объемов рассматриваемого отсека, и, следовательно, исключает возможность характеризовать состояние отсека одним значением скорости.

Классическими уравнениями гидромеханики невозможно описать механизм перемешивания селевой массы, движущейся на больших уклонах в условиях, когда размер «шероховатости» русла может превышать глубину потока. Классическое перемешивание, обусловленное генерированием и трансформацией вихрей, зарождающихся на границе «поток – русло», играет второстепенную роль. Основным механизмом перемешивания становится взаимодействие потока с руслом в условиях непрерывного, во времени и пространстве, изменения характеристик как элементов русла, так и «элементарных» объемов потока. Взаимодействие «элементарных» объемов приводит к тому, что скорость поперечных пульсаций может приблизиться к продольной скорости потока. И хотя это способствует уменьшению продольной скорости движения потока, его мощность как взвесенесущего механизма не только не уменьшается, но может и увеличиваться в результате возрастания коэффициента полезного действия вследствие трансформации механизма перемешивания.

Физическое моделирование осложняется тем, что изменение (уменьшение) размеров твердых частиц селевой массы может приводить к тому, что фракции, не создающие коллоидных растворов в природных условиях, приобретают такую способность при моделировании реологических свойств селевой массы и т.д.

Отсутствие теоретических основ формирования и движения селей, основывающихся на фундаментальных уравнениях физики, значительно затрудняет использование современной вычислительной техники при выявлении основных закономерностей селевых процессов, а также физического моделирования селевых процессов, когда линейные размеры модели на порядки меньше природных. Ожидать в обозримом будущем существенного изменения состояния теории селевых процессов нет оснований, поэтому главным источником знаний, которые могут быть использованы в практике защиты от селей, останется моделирование, критерием качества которого являются результаты наблюдений за селями в природных условиях или при их искусственном воспроизведении в целях более глубокого познания их природы.

Насколько важные (для теории формирования селей и обоснования методов борьбы с ними) выводы могут быть получены в результате мысленного моделирования, можно показать на следующем примере. На протяжении нескольких десятилетий XX века, вплоть до решающих экспериментов по воспроизведению селей на Шамалганском полигоне, господствовало представление о том, что взаимодействие сосредоточенных водных потоков с рыхлообломочными породами не может приводить к формированию грязекаменных селей большой плотности (более 2000 кг/м^3).

Проведем мысленный эксперимент, который способен дать ответ на вопрос: может ли взаимодействие водного потока с рыхлообломочными породами привести к образованию массы с плотностью, при которой у нее исчезает свойство текучести?

Пусть рыхлообломочные породы, принимающие участие в селеформировании, представлены массивом пород, обладающих при влажности, близкой к нулю, сцеплением, обеспечивающим существование уклона поверхности массива, намного превышающего угол естественного откоса обсуждаемых пород, находящихся в рыхлом состоянии; ограничения по времени и пространству отсутствуют.

При движении водного потока по поверхности массива часть воды будет впитываться, в результате чего сцепление в поверхностном слое будет уменьшаться. В результате эрозионного процесса и действия силы тяжести мелкие частицы поверхностного слоя массива будут захватываться водным потоком, образуя суспензию. Более крупные частицы по мере вымывания относительно мелких фракций смогут под действием силы тяжести перемещаться в составе потока либо двигаться практически самостоятельно путем качения или сальтации. По мере затраты воды на смачивание сухих пород массива и вовлечения частиц в состав образующейся селевой массы ее плотность будет увеличиваться и в конечном счете достигнет значения, при котором дальнейшее движение будет носить характер оползня. По мере дальнейшего движения оползневые массы, контактируя с «сухим» массивом, отдадут ему излишки влаги и обретут свойства сыпучей среды.

Таким образом, результаты мысленного опыта свидетельствуют, что принципиальный запрет на образование плотной селевой массы в результате взаимодействия водного потока с рыхлообломочными породами от-

сутствует. Для реализации такого процесса достаточно, чтобы уклон русла обеспечивал самостоятельное перемещение крупных фракций качением или сальтацией, а расход водного потока исключал возможность формирования отмостки, препятствующей размыву селеформирующего грунта (содержащего относительно мелкие фракции), перемещение которых происходит во взвешенном состоянии.

5.1. Физическое моделирование селевых процессов

Несмотря на то, что борьба с разрушительным действием селей имеет тысячелетнюю историю, результаты научных исследований, посвященных вопросам изучения природы формирования селей, оценки эффективности противоселевых мероприятий были получены и опубликованы лишь во второй половине XX века. Этому в решающей мере способствовали данные наблюдений за процессами формирования селей и их взаимодействия с инженерными сооружениями в природных условиях, результаты натурного и лабораторного моделирования, а также накопление сведений о физико-механических характеристиках селеформирующих пород и реологических свойствах селевой массы.

Сложность математического описания процессов зарождения, развития и деградации селевых потоков обусловлена, прежде всего, широчайшим диапазоном размеров частиц твердого компонента. Это обстоятельство сдерживает применение математического моделирования, являющегося эффективным средством исследования физических процессов, позволяющим обобщить результаты единичного опыта и распространить их на группу явлений, подобных изучаемому.

Естественной реакцией на сложившуюся ситуацию было использование естественных объектов, позволяющих воспроизвести сели, идентичные по характеристикам реальным. При этом применялись два метода исследования:

метод, при котором характеристики селеформирующих факторов изменялись по воле экспериментаторов;

метод, при котором изменение характеристик селеформирующих факторов было обусловлено природой.

Первый метод, бесспорно, может быть отнесен к моделированию. Этот метод использовался при искусственном воспроизведении селей на Шамалганском и Шымбулакском полигонах КазНИГМИ, а также в научно-производственных работах Г. В. Иванова.

Второй метод, по нашему мнению, также может квалифицироваться как моделирование: проведение наблюдений за селеформированием в естественных условиях – трудоемкое и дорогостоящее мероприятие, поэтому выбор условий формирования селя (геоморфологические и геологические характеристики селевых очагов, пути движения селей и мест их отложения, степень предварительного увлажнения селеформирующих пород, характеристик паводков или дождей и т.д.), а также выбор створов наблюдений и средств измерений за теми или иными характеристиками условий форми-

рования, движения и отложения селей может рассматриваться как управление селеформирующими факторами, а следовательно, квалифицироваться как моделирование. К таким экспериментам относятся наблюдения, осуществлявшиеся в бассейнах рек Дуруджи и Кокчека.

5.1.1. Эксперименты КазНИГМИ в 1951–1955 гг.

В конце 40-х годов XX столетия Д. Л. Соколовский выдвинул идею создания искусственных селевых паводков, с помощью которых предполагалось заложить основы селевой гидрометрии. Для этой цели был разработан проект воспроизведения искусственных селей. По данному проекту предусматривалось создание водохранилища с объемом около 35 000 м^3. Из-за отсутствия необходимого финансирования проект не был полностью реализован. В сокращенном варианте проекта для создания плотины и водохранилища был выбран участок длиной 260 м, располагавшийся выше устья р. Шымбулак. По проекту максимальный напор над порогом водовыпуска мог составлять 220 см, полезный объем водохранилища при этом напоре достигал 300 м^3. Затвор водовыпуска позволял практически мгновенно осуществлять водный попуск с расходом около 7 м^3/с. Такие попуски, по мнению авторов проекта, по своему характеру похожи на прорыв заторов.

Усилиями сотрудников КазНИГМИ и селестоковой станции Казгидромета удалось воспроизвести ряд небольших искусственных селей, «… некоторое подобие натуральным» [138], тем не менее они дали весьма положительные результаты. Опыты проводились на р. Шымбулак в 1951–1955 гг. (бассейн р. Киши Алматы). Длина экспериментального участка составила 750 м. Всего было проведено 7 экспериментов. Объем каждого паводка был 300–400 м^3, максимальный расход – 10–12 м^3/с, насыщенность потока наносами – 200–400 кг/м^3. Для наблюдений за деформацией русла и движением наносов (камней) экспериментальный участок реки был разбит на 18–20 поперечных створов. Скорость селевого потока определялась по самописцам и киносъемке за передвижением паводочной волны от створа к створу, а также по передвижению крупных камней, которые заранее измерялись и нумеровались, определялись их координаты.

После прохождения селевых паводков обследовали их следы, причем метки уровня высоких вод определялись в течение первых 10–15 мин после их прохождения.

По результатам экспериментов были уточнены известные на то время формулы для определения скорости движения селей.

Изменение уровня селевых паводков (при проведении двух экспериментов) приведено на рисунке 5.1.

Расход жидкого компонента селевых паводков определялся по убыли воды из водохранилища. Общий объем и расход твердого компонента селевых паводков вычислялись по выносам и отложениям рыхлообломочных пород по длине экспериментального участка. При первом эксперименте объемный вес селевой массы на отдельных участках достигал 1320 кг/м^3, при среднем 1260 кг/м^3, или 445 кг твердого материала в 1 м^3 селевой массы.

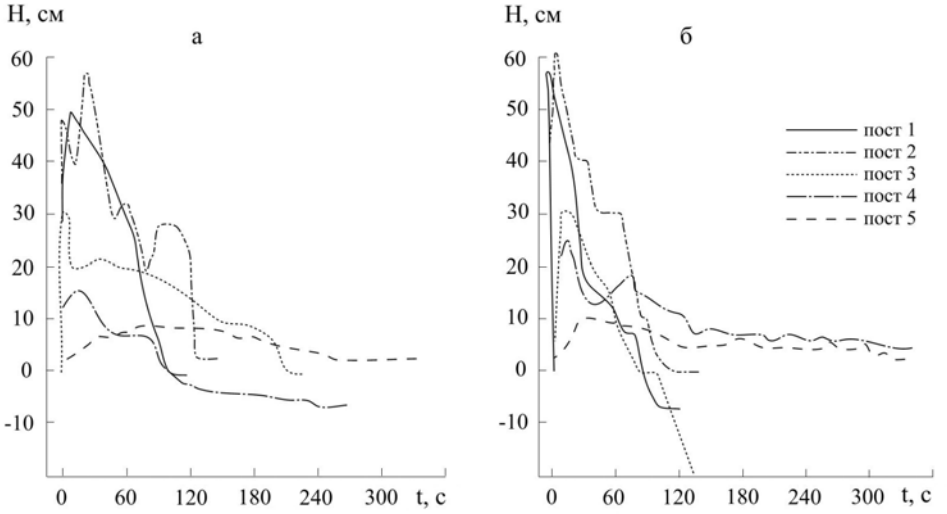


Рисунок 5.1. Изменение уровня селевых паводков в створах постов:
а – эксперимент 28.10.1951 г.; *б* – эксперимент 18.11.1951 г.

При проведении экспериментов с искусственными селями ставилась задача «исследование следов воспроизведенных паводков и определение по ним основных элементов селя с целью развития и оценки этого метода применительно к естественным селям» [138].

По мнению И. П. Смирнова, «… одним из важнейших (опорных) методов изучения основных характеристик селевых паводков должен являться метод наблюдений на стационарах, которые в настоящее время могут быть организованы (пока как опытные) в бассейнах, где наиболее часто проходят сели, а также сделан вывод о целесообразности сочетания стационарных наблюдений за селями с произведением искусственных селей» [138].

5.1.2. Эксперименты Г. В. Иванова

Занимаясь на протяжении ряда лет проходкой геологоразведочных канав в условиях, не позволявших применять для этих целей средства механизации, Г. В. Иванов разработал способ использования энергии искусственно создаваемых водных потоков [139]. Он считал, что на крутых склонах гор наносы, покрывающие почти все коренные породы, удерживаются только силой трения, ослабить которую может смазка, образуемая смесью воды и песчано-глинистых частиц.

Движение смеси воды и горных пород происходит по наклонной поверхности, при этом их потенциальная энергия частично расходуется на измельчение наносов и дробление коренных пород.

Мероприятия, предшествовавшие проведению экспериментальных и производственных работ, сводились к следующему: «… Создается искусственное ответвление от ключа с дебитом в 40–50 л/с (рисунок 5.2), вода из которого направляется в так называемую «водоподводную» канаву, проложенную по косогору с уклоном 0,005 над участком, подлежащем разведке.

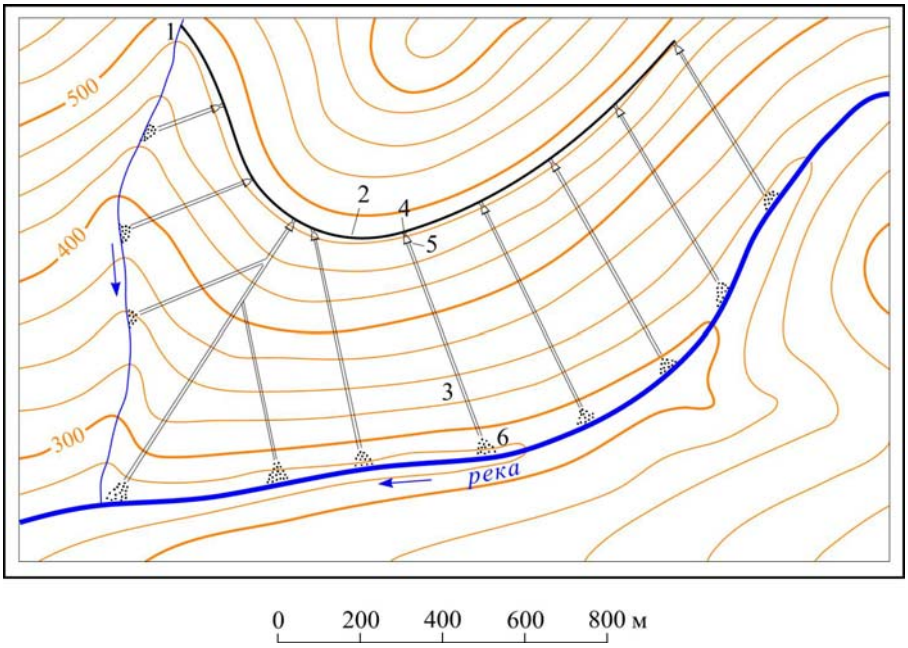


Рисунок 5.2. Расположение объектов, принимающих участие в эксперименте.
1 – искусственное ответвление от ключа; *2* – водоподводная канава;
3 – разведочная канава; *4* – котлован; *5* – плотина; *6* – отвал

По трассе разведочной канавы прокладывается направляющая канавка сечением 20×20 см. Вверху этой канавки, т.е. у водоподводной канавы, выкапывается котлован и сооружается легкая дощатая плотина.

Разведочная канава проходится следующим образом. По направляющей канавке в течение нескольких часов пропускается вода при открытом отверстии плотины. За это время канавка несколько углубляется за счет выноса глинистых, пылеватых и песчаных частиц, а остальной грунт сильно увлажняется на глубину 40–60 см.

После увлажнения рыхлообломочных пород отверстие плотины перекрывается. По прошествии необходимого для накопления котлована времени (обычно 20–40 мин) отверстие открывается и вода с объемом 25–40 м^3 устремляется в направляющую канавку. Водный поток, вырываясь из отверстия плотины за 5–10 с, имел расход около 5 м^3/с.

По мере захватывания в движение крупнообломочного материала поток начинает постепенно разбиваться на ряд валов (волн) и становится типичным селевым. Объем потока постепенно увеличивается и иногда достигает 100–150 м^3, а объем каждого вала – 10–15 м^3. Количество таких валов в каждом потоке редко превышает 3–4» [139].

Анализ ситуаций, имевших место в процессе зарождения, развития и деградации описанных процессов, позволил Г. В. Иванову констатировать:

никогда не наблюдалось вовлечения всего материала затора в новое движение последующими селевыми потоками;

при растекании селевого потока начинаются отложение рыхлообломочного материала и образование отвала;

глинистый материал не является единственной причиной движения камней, он только способствует этому движению, создавая смазку и уменьшая этим трение;

могут возникать валы, состоящие из камней размером до 0,7 м в поперечнике, движущиеся впереди глинистой массы в верхней части канавы; отдельные камни могут вырываться из каменного вала и скачкообразно двигаться вниз по дну канавы;

образование волн в селевом потоке происходит не путем прорыва заторов, а в процессе его движения;

грубообломочный материал нельзя считать пассивной составляющей, его движение нельзя рассматривать в отрыве от движения грязевой массы;

на большей части длины канавы количество твердых частиц было очень велико и часто превышало 90 % объема потока (во взятых пробах иногда почти не отстаивалась вода).

Критикуя способ борьбы с селями путем разбавления селевой массы водой, Г. В. Иванов писал: «М. С. Гагошидзе рекомендует для ликвидации селевого потока воспользоваться как раз тем способом, который мы применяем для создания селевых потоков». Столь же негативным было его отношение к рекомендации Н. С. Дюрнбаума, предлагавшего как одно из «активных мероприятий» «… спрямление русел (для ликвидации возможных заторов расчистка русел, устройство подпорных стенок и т.п.)». Спрямление русла, считал Г. В. Иванов, «… приведет к увеличению скорости движения селевого потока и его размеров. … Н. С. Дюрнбаум, М. С. Гагошидзе и другие видят опасность не только в образовании волн, они предостерегают от искусственных накоплений наносов выше населенных пунктов, опасаясь вовлечения их в новое движение последующими селевыми потоками».

Г. В. Иванов считал, что «… заторы, образованные выше угрожаемых пунктов, располагающихся над поверхностью земли, не создают угрозы этим населенным пунктам … Исходя из сказанного нам представляется нецелесообразным улавливание селевых потоков в ямах. Они, несомненно, эффективны, но дорого стоят, особенно если иметь в виду очистку их после прохождения каждого селя. Нам представляется более целесообразным строительство и последующее наращивание плотин» [139].

5.1.3. Исследования Г. М. Беручашвили

Высказанная казахстанскими исследователями мысль о перспективности исследований в бассейнах, где наиболее часто проходят сели, нашла свое воплощение в работах ученых Грузгипроводхоза. Для этих целей были организованы две стационарные селенаблюдательные станции. Одна – в селевых очагах р. Шави Дуруджи на высотной отметке 1500 м, вторая – в каньоне, у конца транзитной зоны, на отметке 840 м. За 1961–1967 гг. наблюдались 150 селевых потоков, из которых 6 имели расход от 60 до 1250 $м^3/с$ [40].

Большой интерес представляют подготовка рыхлообломочных пород к сдвигу и собственно процесс трансформации сдвига в селевой поток, происходящие на южном склоне Главного Кавказского хребта в бассейне р. Дуруджи. «Селеобразующий очаг представляет собой участок дна горной долины, на котором накапливается твердый минеральный материал, поступающий с поверхностей оголенных склонов» [40]. Относительное превышение склонов над селевыми очагами – 500–1200 м, крутизна склонов – 30–60° и более. Основными поставщиками рыхлообломочной породы являются небольшие, но многочисленные оползни и осыпи. Часть мелких фракций поступает с временными водными потоками, лавинами и т.д. Минералогический состав пород – глинистые сланцы, незначительную долю составляют песчаники. Гранулометрический состав: глины – 3–4 %, пыль – 16–18 %, песок – 10–15 %, остальная часть приходится на фракции более 1 мм.

Процесс накопления рыхлообломочных пород начинается после прохождения очередного селя, когда практически весь рыхлообломочный массив, накопившийся ранее, выносится за пределы долины. В первой стадии накопления, когда мощность отложений невелика, рыхлообломочный материал характеризуется большими значениями пористости и угла внутреннего трения. По мере возрастания мощности отложений, вследствие чего вероятность выноса мелких фракций уменьшается, поры заполняются мелкими фракциями. Трансформация гранулометрического состава рыхлообломочных пород, обусловленная процессами физического и химического выветривания, взаимодействия воды с пылевато-глинистыми фракциями, сопровождающееся увеличением объема селевой массы, заполняющей поровое пространство, образуемое относительно крупными частицами, приводят к расклиниванию этих частиц, уменьшению числа жестких контактов между ними. Благодаря этому, а также взвешивающему воздействию (архимедова сила) образующейся вязкопластической среды, заполняющей поровое пространство, на относительно крупные частицы угол внутреннего трения образующейся смеси уменьшается. Тем самым создаются предпосылки для локальных деформаций массивов. В свою очередь, результатом деформации является разуплотнение массивов (увеличение пористости) и, как следствие, увеличение кулоновского трения. Это приводит к прекращению деформации. Со временем образовавшиеся при деформациях поры заполняются тонкодисперсными фракциями. Вновь происходят деформации и т.д.

Трансформация массива селеформирующих пород вступает в заключительную фазу, когда его мощность достигает критического значения (плотность массива – 2400 кг/м^3 при удельном весе 2650–2700 кг/м^3) [41]. При этом образовавшийся массив переходит в состояние предельного равновесия: объем массы (за счет увеличения пористости) растет, а плотность уменьшается и достигает 1800–2000 кг/м^3. Критическая глубина массива в селевом очаге р. Шави Дуруджи равна 8–9 м.

Выпадение ливневых осадков слоем 60–70 мм и интенсивностью 0,7–1 мм/мин приводило к возникновению катастрофических селей с расходом

до 1250 $м^3/с$ и плотностью селевой массы до 2320 $кг/м^3$. Объем каждого селевого потока определялся на основе его гидрографа (в створе нижней станции), топографических съемок селевых очагов, а также конусов выноса до и после возникновения и прохождения селей.

Результаты наблюдений за поверхностной и средней скоростями (за среднюю скорость принималась скорость движения фронта потока) селевых потоков привели авторов экспериментов к выводу: «… Течение селевых потоков в собственном динамическом русле подчиняется законам вязкого течения с ламинарным распределением местных скоростей».

Основные выводы авторов экспериментов по результатам семилетних наблюдений:

1. Селевые потоки возникают в результате нарушения устойчивости грунтовой массы, находящейся в селевых очагах. Увеличение сдвигающих напряжений (при постоянном уклоне селевого очага) происходит за счет нарастания мощности грунтовой массы и влияния гидродинамического давления инфильтрационного потока, возникающего за счет склонового стока. Процесс возникновения селевого потока относится к гравитационным процессам.

2. Селевые потоки (грязекаменные и грязевые) представляют собой явление быстрого (метры в секунду) течения грунта по дну долины.

3. Масса селевого потока вследствие содержания в ней значительного количества рыхлообломочных пород обладает свойством изменения объема – дилатансии, вызываемой деформацией сдвига или градиентом скорости.

4. Кинематическое поле локальных скоростей селевого потока (при средних скоростях течения 1–10 м/с и плотности селевой массы 1,7–2,1 $т/м^3$) подчиняется закону вязкого течения с ламинарным распределением скоростей по вертикали, средняя скорость в сечении равна половине максимальной поверхностной скорости.

5. Градиент скорости по сечению потока, а также изменение плотности и консистенции селевой массы (вызванное присоединением дополнительных объемов воды притоков и уменьшением величин продольных уклонов русла) приводят к «осветлению» массы потока от крупных включений. По мере удаления селевой массы от места ее образования средний диаметр частиц уменьшается и, следовательно, текучесть массы возрастает. Поэтому грязекаменный поток может превратиться в грязевой, а последний – трансформироваться в паводок, предельно насыщенный наносами.

5.1.4. Исследования КазНИГМИ. Селевой очаг в бассейне руч. Кокчека

Благоприятное сочетание климата и ландшафта создает в низкогорной и среднегорной зонах Иле Алатау условия, при которых в весенне-летние периоды формируются несколько селей дождевого генезиса. Систематические наблюдения за условиями формирования, движения и отложения селей проводились сотрудниками КазНИГМИ в 1966–1967 гг. в бассейне

руч. Кокчека (бассейн р. Улькен Алматы, Иле Алатау), где имел место совершенно иной механизм образования селей по сравнению с механизмом селеобразования в бассейне р. Шави Дуруджи.

Селевой очаг в бассейне руч. Кокчека образовался в результате обвала, вызванного мощным землетрясением в 1887 г. (рисунок 5.3). Горные породы, представленные сиенитами, розовыми и порфировидными гранитами, прилегающие к плоскости скольжения обвалившегося блока, претерпели интенсивное механическое воздействие, что привело к их существенному разупрочнению. Вследствие этого лишенные почвенно-растительного покрова скальные породы верхней и средней частей селевого очага подвергаются интенсивному выветриванию, пополняющему запасы рыхлообломочных пород, принимающих участие в селеобразовании. Склоны сильно размыты, широко распространены эрозионные борозды, наиболее крупные

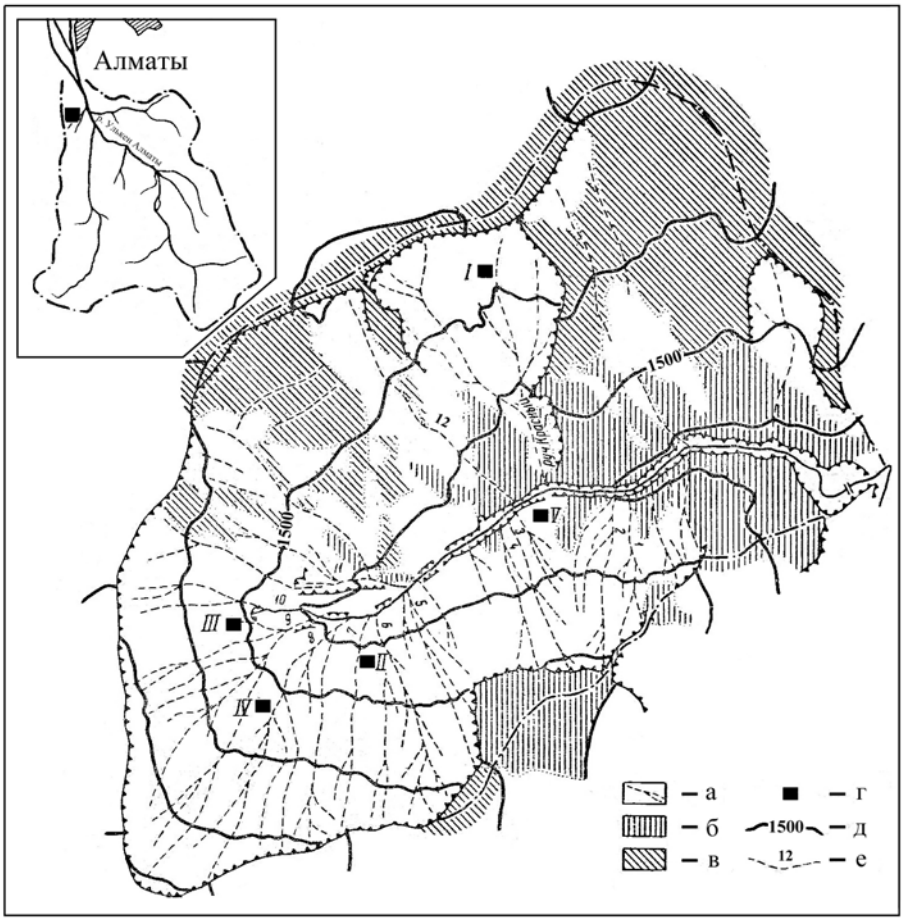


Рисунок 5.3. Схематическая карта селевого очага в бассейне руч. Кокчека.
а – участки, лишенные почвенно-растительного покрова;
б – участки под лесом; *в* – участки под горно-луговой растительностью;
г – шурфы (I-V); *д* – изогипсы; *е* – кулуар [140]

из них врезаны в склоны вплоть до коренных пород. Площадь участков, лишенных почвенно-растительного покрова, составляет до 70 % от всей площади бассейна. При интенсивных и продолжительных дождях они становятся водосборами и ареной селеформирования. Как показали наблюдения, минимальный слой осадков, необходимый для формирования селей, составляет 15 мм. Однако интенсивность выпадения осадков при этом должна превышать 0,15 мм/мин.

Морфометрические характеристики бассейна руч. Кокчека:
площадь бассейна – 0,214 км^2;
площадь, лишенная почвенного покрова, – 0,140 км^2;
площадь участков под лесом – 0,027 км^2;
площадь участков под горно-луговой растительностью – 0,047 км^2;
длина русла – 587 м;
уклон русла – 0,207;
коэффициент извилистости русла – 0,855;
средняя крутизна склонов основного селевого очага – 43°;
средняя крутизна левого склона бассейна – 33°;
средняя крутизна правого склона бассейна – 41°;
в селевом очаге коренные породы выходят на дневную поверхность в верхних и средних частях склонов [140].

Одному из авторов монографии посчастливилось наблюдать процесс селеобразования, находясь в центральной части селевого очага, где происходит слияние мелких потоков в один, более мощный.

Интенсивность осадков, по субъективному ощущению, превышала 1 мм/мин. Буквально через несколько минут склон, крутизна которого была близка к 40°, «ожил», покрывшись сетью микроручейков. Камни, размером 10–50 мм, начали шевелиться, а затем катиться, подпрыгивая, вниз по склону. Складывалось впечатление, будто склон покрылся движущейся, колышущейся, шуршащей и постукивающей сеткой. Слияние микроручейков приводило к образованию более крупных ручьев, слияние последних на уклоне, близком к 10–15°, – к созданию единого потока, состоявшего из суспензии и относительно крупных частиц горных пород.

В начальной фазе селевого процесса еще не набравший силы поток помещался в ранее образованном русле и в основном углублял его. В плане это русло имело зигзагообразную форму, что, вероятно, было обусловлено (в ходе формирования русла) наличием относительно крупных частиц в грунте и малым расходом руслообразующих потоков.

С увеличением расхода и скорости движения сель начал «метаться» в «меандрах», быстро вовлекая в движение грунт, слагавший борта русла. Когда динамическое воздействие потока превышало прочность утончавшихся стенок русла, поток пробивал очередную стенку, спрямляя русло и обогащаясь рыхлообломочными породами.

Ю. Б. Виноградов, касаясь проблемы формирования селей в очагах рассредоточенного селеобразования, писал: «… Несколько слов о сходстве и различии формирования селевых потоков в очагах локального и площадного селеобразования. Физика процесса в обоих типах очагов одинакова. И

здесь, и там селеформирование определяется сдвигом и последующим массовым движением рыхлообломочной породы. Различие между очагами локального и площадного селеобразования скорее чисто количественное. В первом случае мы можем себе позволить рассматривать очаг как индивидуальный объект, во втором приходится говорить о площади, в пределах которой находится большое количество локальных микроочагов, которые расположены обычно на настолько крутых склонах, что при намокании рыхлой породы и поверхностном и фильтрационном подтоках дождевой воды в борозды и кулуары немедленно происходит формирование мелких грязевых или грязекаменных потоков, которые затем объединяются в едином селевом русле» [141].

Целью исследований, проводившихся в бассейне руч. Кокчека, являлись:

изучение процессов селеформирования и определение количественных значений факторов, определяющих эти процессы;

наблюдение за прохождением селей и измерение их основных характеристик.

Степень подготовленности процесса селеформирования на объекте наблюдений определялась наличием рыхлообломочных пород на крутых склонах селевого очага и в русле водотока, а также их предварительным увлажнением. К сожалению, процессы накопления рыхлообломочных пород в осенне-зимний период, обусловленные воздействием выветривания и отложением микроселей, не наблюдались. Достоверно было установлено, что к осени кулуары селевого очага и русло основного водотока полностью очищались весенне-летними селями до коренных пород.

Основное внимание уделялось наблюдениям за влажностью рыхлообломочных пород и режимным наблюдениям за осадками, температурой и влажностью воздуха, так как они определяли динамику увлажнения рыхлообломочных пород. Данные о влажности рыхлообломочных пород использовались при расчете слоя первоначальных потерь, определяющихся дефицитом влаги в верхнем 50-миллиметровом слое селеформирующих пород.

Наблюдения за селями включали в себя измерение уровня и поверхностной скорости селевых потоков, скорости движения крупных каменных включений, а также плотности селевой массы. Измерение характеристик осуществлялось визуально и с помощью самописцев.

Максимальное значение плотности, измеренное при прохождении селевых потоков, составляло 2300 кг/м^3, минимальное – 1440 кг/м^3. Эти величины не отражают в полной мере плотность селевой массы, поскольку в пробоотборники не попадали крупные каменные включения, что и занижает значения плотности. Плотность селевой массы определялась преимущественно интенсивностью осадков и степенью запасов рыхлообломочных пород на склонах селевого очага. Результаты механического анализа проб грунта представлены в таблице 5.1 [140]. Средний гранулометрический состав твердого компонента проб селевой массы приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.1. Результаты механического анализа проб грунта, %

№ шур-фа	Диаметр фракций, мм											
	>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
1	34,3	8,3	6,7	8,5	5,6	7,4	8,0	9,4	5,8	1,3	2,5	2,2
2	26,5	7,6	5,7	7,9	5,9	9,2	15,8	11,1	5,5	1,4	2,1	1,3
3	16,4	7,7	6,9	10,2	6,7	10,0	15,6	14,3	7,2	1,8	2,0	1,2
4	20,4	5,5	5,3	7,6	5,9	11,0	18,3	13,7	7,3	1,1	2,0	1,9
5	18,0	5,0	4,0	6,0	4,6	7,1	12,8	18,7	12,0	2,7	5,3	3,8

Таблица 5.2. Результаты определения гранулометрического состава твердого компонента проб селевой массы, %

№ пробы	Диаметр фракций, мм								
	>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,002
1	43,9	3,7	3,5	5,9	4,2	7,5	7,2	17,7	6,4
2	15,4	9,1	5,4	8,2	6,2	10,1	10,8	25,3	9,5
3	8,8	4,6	4,3	7,6	6,5	12,8	13,9	27,5	14,0

Результаты сопоставления плотности проб селевой массы с данными о гранулометрическом составе их твердого компонента показали, что максимальной плотности селевой массы соответствует максимальное содержание крупных каменных включений (d>10 мм).

Глубина наблюдавшихся селей в среднем составляла 0,3–0,4 м; максимальная глубина, близкая к 1,5 м, наблюдалась короткое время 29.05.1969 г. Гидрограф этого селя приведен на рисунке 5.4.

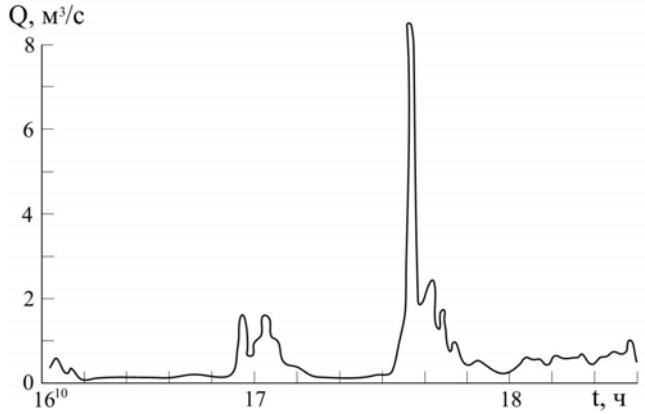


Рисунок 5.4. Гидрограф селевого потока 29.05.1969 г.

Максимум максиморум расхода селя составлял 8,3 $м^3/с$. Объем селевых потоков изменялся от 100 до 5000 $м^3$ [142].

Наблюдения за процессами селеформирования в бассейне руч. Кокчека показали, что главная роль в формировании и движении селей, образующихся на крутых эродированных склонах, принадлежит гравитации. Была установлена связь между интенсивностью осадков и плотностью селевой массы, а также получены данные о распределении скорости в селевых потоках, образующихся в селевых очагах, гранулометрический состав селеформирующих пород которых в значительной мере обязан воздействию мощных сейсмических волн на коренные породы.

Установлено также, что уменьшение плотности селевой массы сопровождается смещением максимума относительного содержания фракций гранулометрического состава на более мелкие фракции, в основном диаметром менее 1 мм.

5.1.5. Эксперименты КазНИГМИ в верховьях р. Шамалган

К середине 60-х годов XX века был накоплен значительный фактический материал об особенностях взаимодействия сосредоточенного водного потока с рыхлообломочными породами, полученный как при проведении научных экспериментов, так и в ходе производственной деятельности, когда энергия водного потока использовалась в качестве средства механизации трудоемких операций при проходке геологоразведочных канав.

Однако к этому времени в понимании природы формирования селей имелись не только «белые пятна», скорее это было сплошное «белое пятно». Теория формирования селей практически отсутствовала. Это не позволяло сформулировать критерии подобия, без которых моделирование селей в лабораторных условиях и ограниченных природных масштабах не имело научной и практической ценности. Отсутствие достоверных критериев подобия при моделировании селевых процессов исключало использование полученных результатов для познания закономерностей формирования, движения и деградации реальных селей, а также расчета их количественных характеристик. Для этого требовалось воспроизведение селевых потоков в натуральном масштабе, т.е. на 1–2 порядка превышающих масштабы предшествовавших экспериментов по воспроизведению искусственных селей.

Настоятельная потребность в проведении таких экспериментов в горных районах Тянь-Шаня или Жетысу Алатау была обусловлена и тем, что в этих районах формируются сели дождевого генезиса с расходом тысячи кубометров в секунду и объемом несколько миллионов кубометров. В середине прошлого столетия считалось, что взаимодействие сосредоточенного водного потока с рыхлообломочными породами не может приводить к образованию селей с плотностью селевой массы, превышающей 1600–1800 $кг/м^3$. И. В. Егиазаров [99], ссылаясь на Р. Багнольда, писал: «При концентрации в 35 % турбулентные пульсации совершенно прекращаются. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к «замораживанию»,

затору всей массы взвешенных наносов, примерно при 57 % по объему». Отсутствие турбулентности – основного источника энергии, которая может быть использована потоком для взвешивания частиц грунта, и препятствовало, по мнению М. А. Великанова, образованию селевой массы с плотностью, превышающей 1800 кг/м^3, в результате взаимодействия сосредоточенного водного потока с рыхлообломочными породами [74].

По данным Казгидропроекта [143], расчетные параметры возможного селевого потока на р. Киши Алматы при обеспеченности 0,01 % составляли: объем селя – 5082 тыс. м^3, общий объем наносов в плотном теле – 1681 тыс. м^3. И это при том, что (по данным Главного управления гидрометслужбы СССР) максимальный расход этой реки, повторяемостью 1 раз в 1000 лет, составлял лишь 34,6 м^3/с! Стократное несоответствие максимального расхода реки и расхода жидкого компонента селевого потока в ситуации, когда объем твердого компонента селя 1921 г. имел величину, близкую к расчетному значению Казгидропроекта, требовало ответа на вопрос: каково же реальное соотношение жидкого и твердого компонентов в селевой массе 1921 г.? Ведь если объем твердого компонента был пусть примерно оценен, то объем жидкого компонента получен расчетным путем в предположении об ограниченной транспортирующей способности водного потока.

Изложенное, а также результаты наблюдений за условиями формирования селей в бассейне р. Дуруджи, где грязекаменные сели высокой плотности образуются в результате потери устойчивости водонасыщенными грунтовыми массивами, по всей вероятности, и натолкнули Ю. Б. Виноградова на мысль о симбиозе эрозии и сдвига в процессе формирования грязекаменных селей большой плотности при взаимодействии водного потока с рыхлообломочными породами в селевых очагах. По Ю. Б. Виноградову, именно эрозионно-сдвиговые процессы породили крупные грязекаменные потоки, в том числе сель на р. Киши Алматы в 1921 г.

Процесс взаимодействия водного потока и потенциального селевого массива, по мнению Ю. Б. Виноградова, представляет собой последовательный сдвиг отдельных блоков породы, имеющих толщину, близкую к размерам наиболее крупных глыб, и протяженность сдвигаемого блока, равную высоте волны водного потока. Сдвиг блока породы происходит, когда глубина водного потока превышает критическое значение, при этом сдвигающие и удерживающие силы становятся равными. Исключительную роль при этом играет постулат о равенстве нулю величины сцепления для заполненной водой рыхлообломочной породы.

Такой механизм селеформирования при условии, что разжижение сдвинувшихся блоков породы за счет окружающей их воды не происходит, в принципе мог приводить к образованию массы, плотность которой определяется содержанием поровой воды (если при этом масса обладает текучестью).

Ответить на эти и многие другие вопросы, имеющие принципиально важное значение для прогноза основных характеристик селей, образующихся в результате взаимодействия сосредоточенного водного потока с

рыхлообломочными породами, представленными частицами с размером от долей микрона до 10 м и более, мог только эксперимент. Эксперимент, свободный от недостатков, присущих в той или иной мере предшествовавшим опытам: «искусственность» селевых очагов и их незначительные уклоны, малые объем и расход водных попусков, ограниченные возможности вовлечения рыхлообломочной породы, ограниченность во времени и пространстве развития селевого процесса.

Всего этого можно было избежать, проводя эксперименты в природных условиях, т.е. там, где ранее неоднократно формировались сели разной мощности. С учетом сказанного эксперименты по искусственному воспроизведению селей было решено проводить в естественном селевом очаге, расположенном в бассейне р. Шамалган в 50 км от г. Алматы (рисунок 5.5).

«Искусственность» воспроизведения селей состояла лишь в том, что водные попуски осуществлялись из водохранилища, а их расход и продолжительность регулировались открытием затворов. Водные паводки с такими характеристиками могли формироваться в природных условиях при выпа-

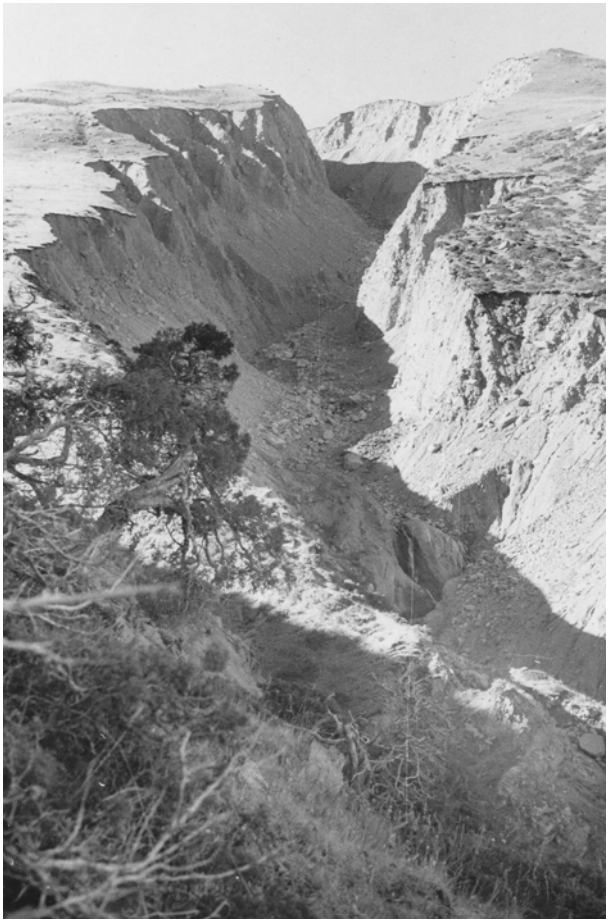


Рисунок 5.5. Шамалганский главный селевой очаг

дении ливневых дождей или прорыве поверхностных или подземных водоемов моренно-ледниковых комплексов.

Подготовительные работы проводились в теплые периоды 1970–1971 гг. Была осуществлена крупномасштабная (1:1000) топографическая съемка селевого очага, транзитной зоны и той части долины р. Шамалган, где должно было происходить основное отложение экспериментальных селей. Плотинный узел был сконструирован и возведен сотрудниками СКБ завода «Казгеофизприбор» и отдела селей КазНИГМИ. Емкость водохранилища была оценена в 70–75 тыс. м^3. Максимальный расход водных попусков мог достигать 80–100 м^3/с при длительности попусков до 30 мин. Зависимость площади зеркала водохранилища и его объема от уровня заполнения водохранилища показана на рисунке 5.6.

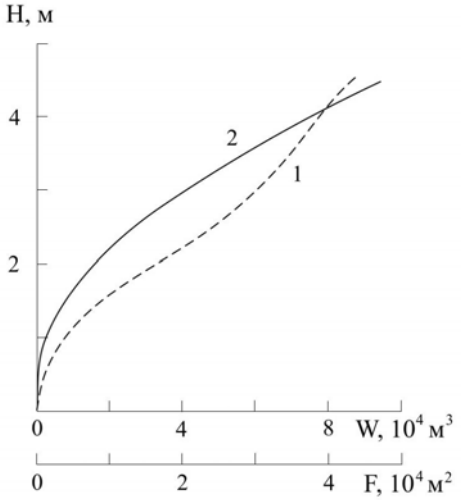


Рисунок 5.6. Зависимость площади зеркала (*1*) водохранилища и его объема (*2*) от уровня заполнения водохранилища

Для определения объема рыхлообломочных пород, выносимых из главного селевого очага, отложений в транзитной зоне и на поле выноса, была создана система поперечных профилей: в главном селевом очаге – 28, в зоне транзита – 10, в нижнем селевом очаге – 19 и на поле выноса – 16. Система геодезических профилей охватывала 6,8 км русла р. Шамалган.

Схематические планы главного селевого очага, зоны транзита и нижнего селевого очага приведены на рисунках 5.7–5.9.

Длина главного селевого очага по тальвегу составляла 930 м, площадь – 70 400 м^2, средняя глубина селевого очага – 45 м, максимальная – 75 м, наибольшая ширина селевого очага – 150 м, средний уклон по тальвегу – 16°, объем селевого очага – 3,17 млн м^3. Гранулометрическая кривая селеформирующих пород селевого очага представлена на рисунке 5.10, физико-механические характеристики рыхлообломочных пород в естественном залегании – в таблицах 5.3, 5.4 [144]. Петрографические и физические характеристики крупных обломков приведены в таблице 5.5.

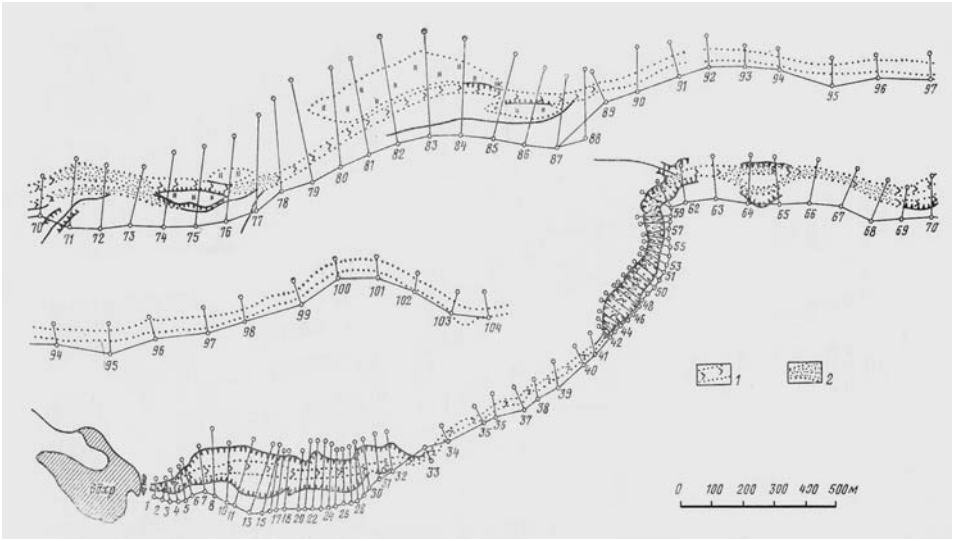


Рисунок 5.7. Схема поперечных профилей и расположение участков размыва (*1*) и отложений (*2*) селевого потока в 1972 г. в бассейне р. Шамалган

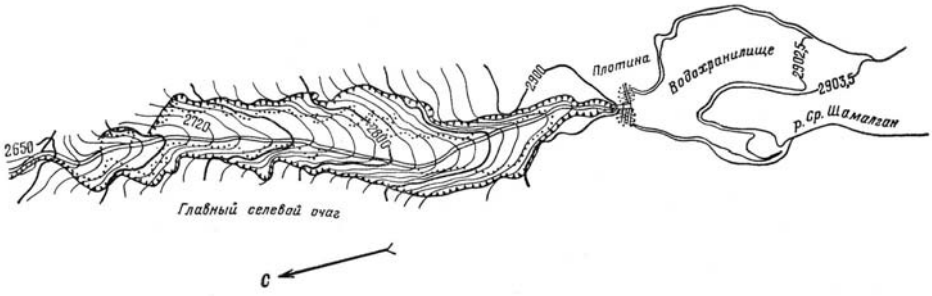


Рисунок 5.8. Схематический план главного селевого очага и водохранилища

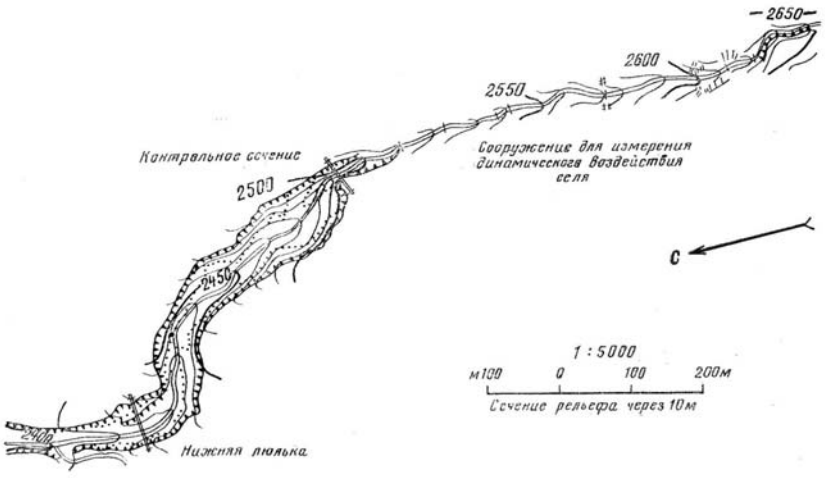


Рисунок 5.9. Схематический план зоны транзита и нижнего селевого очага

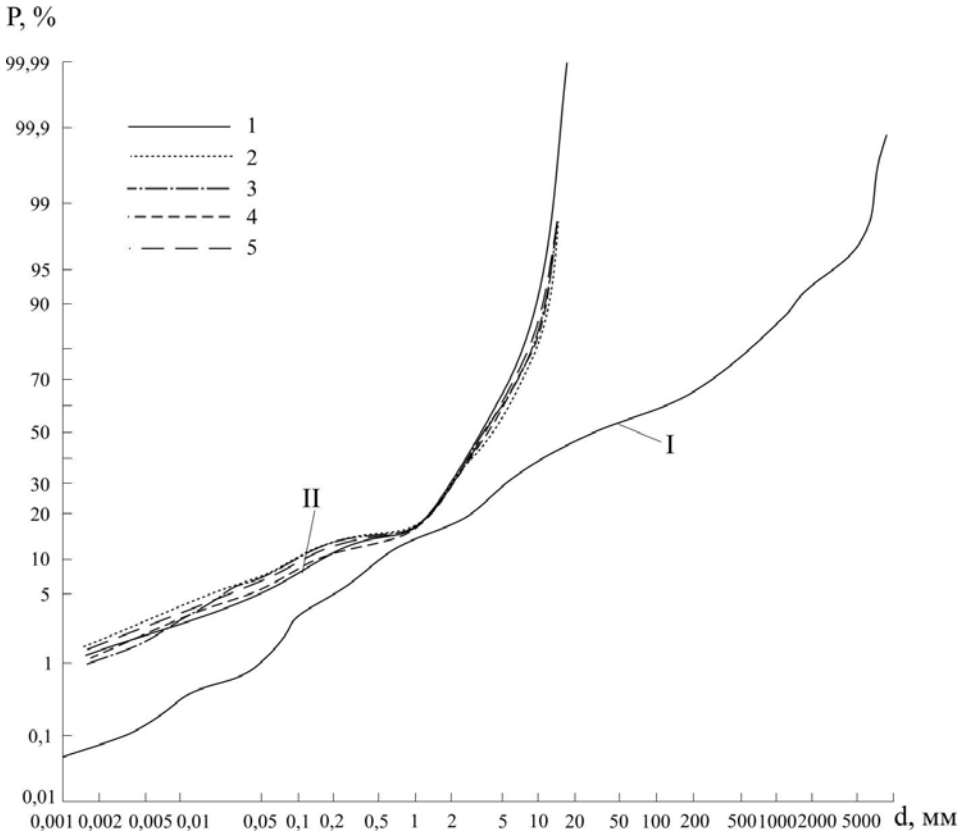


Рисунок 5.10. Интегральные графики гранулометрического состава селеформирующих пород Шамалганского селевого очага.
I – гранулометрический состав ПСМ; II – гранулометрический состав заполнителя основных селеформирующих грунтов; *1* – аллювиально-пролювиальные, селевые грунты; *2* – пролювиальные грунты боковых притоков; *3* – верхнечетвертичные моренные грунты (верхний уступ); *4* – делювиально-гравитационные и гравитационные (склоновые) грунты; *5* – верхнечетвертичные моренные грунты (нижний уступ)

Таблица 5.3. Физико-механические характеристики рыхлообломочных пород

№ выработки	Объем вынутой породы, дм^3	Вес вынутой породы, кг	Влажность, %			Плотность грунта, кг/м^3	
			мелкозема (<2 мм)	обломков (>2 мм)	грунта в массиве	в естественном залегании	абсолютно сухого грунта
Ш-1	1307	2672	12,0	0,6	3,6	2040	1970
Ш-2	1089	2440	15,6	0,6	4,0	2240	2150
Ш-5	7375	16408	11,5	0,6	2,3	2200	2170
Ш-7	518	1162	8,8	0,6	2,9	2250	2190
Ш-6	892	1965	9,7	0,6	3,2	2200	2130

Таблица 5.4. Гранулометрический состав рыхлообломочных пород в естественном залегании, %

№ выработки	Размер фракций, мм										
	1000-500	500-200	200-100	100-50	50-20	20-2	2-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,002	<0,002
Ш-1	2,3	20,0	7,1	6,7	5,9	30,7	24,8	1,5	0,5	0,3	0,2
Ш-2	2,2	15,4	3,0	5,6	5,9	44,2	21,3	1,8	0,1	0,1	0,4
Ш-5	8,7	50,3	9,5	1,8	1,9	10,2	14,7	1,8	0,5	0,3	0,3
Ш-7	10,4	16,8	6,6	5,8	5,9	26,0	26,5	1,6	0,2	0,1	0,1
Ш-6	11,0	5,1	1,6	4,4	5,8	43,6	26,2	1,7	0,2	0,3	0,1

Таблица 5.5. Физические характеристики крупных обломков разного петрографического состава

Петрографические разности пород	Плотность обломков при естественной влажности, кг/м^3	Естественная влажность (по весу),%	Плотность, кг/м^3			Пористость, %
			абсолютно сухих обломков	вещества мелкозема	вещества по литературным данным	
Граниты	2540	0,6	2520	2700	2650	5
Диориты	2800	0,6	2780	2700	2900	4

На высотах 2650–2500 м русло реки представляет собой желоб, выработанный в коренных гранитоидных породах. Общая длина русла составляет 760 м при среднем уклоне 11,5°. На этом участке русла, обладающем малой шероховатостью и большой извилистостью, перемешивание селевой массы становится максимальным, вследствие чего отложение селевой массы (в том числе крупных частиц) практически не происходит. Это создает идеальные условия для оценки относительной скорости жидкого и твердого компонентов селевого потока.

На высоте 2484 м находится водопад общей высотой около 12 м, за которым расположен нижний селевой очаг, длина которого составляла 510 м, средний уклон его тальвега – 7,5°. Ниже этого селевого очага расположено поле выноса, ширина которого в среднем была 150 м, длина – более 2,5 км, средний уклон – 5°.

Для определения характеристик селей использовался комплекс селеметрической аппаратуры, особенностью которого являлось отсутствие механического контакта между селевым потоком и датчиками. Он включал в себя:

двухчастотный допплеровский измеритель поверхностной скорости потока и расстояния до его поверхности, что в не размываемом русле позволяло вычислять глубину потока;

сейсмический измеритель расхода селя;

квантовый магнитный градиентометр (интерпретация данных, получаемых с его помощью, позволяла определять среднюю плотность селевой массы в объеме 300–500 м^3).

Все способы бесконтактного измерения характеристик селей и оповещения о селевой опасности защищены авторскими свидетельствами на изобретения.

На все способы и конструкции измерительных устройств были получены авторские свидетельства СССР на изобретения [145–147]. Кроме того, осуществлялась стереоскопическая фотосъемка поверхности селя, а также съемка 35-миллиметровыми цветными профессиональными кинокамерами, число которых в эксперименте 1972 г. составляло 16.

Измерительный комплекс располагался над транзитным руслом выше водопада, за которым начинался нижний селевой очаг. Поскольку русло было образовано в коренных породах, его характеристики оставались практически неизменными на протяжении всех экспериментов, осуществлявшихся в 1972, 1973, 1975, 1976 и 1978 гг.

Первый эксперимент по воспроизведению искусственных селей на Шамалганском полигоне начался в 12 ч 15 мин 27 августа 1972 г. при уровне заполнения водохранилища 3,06 м, что соответствовало объему накопленной воды 42 тыс. м^3. На открытие затворов плотины было затрачено 2 мин, на закрытие – 4 мин 15 с, истечение воды при полностью открытых затворах длилось 12 мин 15 с. На момент закрытия затворов уровень воды в водохранилище понизился на 0,4 м.

Пространственное перераспределение объема рыхлообломочных пород, в ходе их вовлечения в селевой процесс и отложения твердого компонента при деградации селя на относительно малых уклонах, рассчитывалось на основе данных топографических измерений, которыми было охвачено 4,6 км селевого очага, русла и поля выноса. Нивелирование проводилось на 84 поперечных профилях, из которых 28 были расположены в селевом очаге, 10 – в русле реки, 19 – в нижнем селевом очаге и 27 – на поле выноса. Установлено, что из селевого очага вынесено 24,2 тыс. м^3 рыхлообломочных пород. Около 50 % объема пород вовлечены до 15-го поперечника, ниже его интенсивность вовлечения рыхлообломочных пород в селеобразование уменьшалась. Увеличение объема селевого потока происходило до 47 поперечного профиля, после чего произошло значительное отложение селевой массы. Ниже 62 поперечного профиля объем селя увеличивался или уменьшался, однако до 78-го профиля преобладало отложение селевой массы. В дальнейшем, до 88 профиля, объем селя возрастал. Ниже 88 профиля на протяжении 6 км отложения визуально имели вид, типичный для грязекаменных селей Иле Алатау. Было определено, что изменение уклона русла на этом участке носило знакопеременный характер на фоне общего незначительного уменьшения уклона долины. Вовлечение рыхлообломочных пород в селевой процесс происходило на участках сужения русла, отложение – в местах расширения поймы, на поворотах и разветвлениях русла.

Полученные данные позволяют предположить, что вовлечение или отложение твердого компонента селевой массы определялось энергией потока, которая возрастала с ростом его глубины с одновременным повышением скорости. Средняя плотность селевой массы оценена в 2070 кг/м^3.

В процессе подготовки к проведению первого эксперимента по воспроизведению искусственного селя в донной части главного селевого очага в целях определения гранулометрического состава и плотности селеформирующих пород в условиях природного залегания был пройден семиметровый шурф.

После завершения этих работ в шурфе была установлена труба диаметром 0,2 м, которая в комплексе с измерительным и регистрирующим устройствами предназначалась для контроля за уровнем грунтовых вод. Это устройство должно было подтвердить гипотезу, в соответствии с которой «… поступление прорывной волны достаточной мощности в очаг локального селеобразования приводит к затоплению рыхлообломочных отложений. Вибрационные сотрясения, вызванные прохождением прорывной волны, разрушают жесткие связи затопленного грунта. В этом случае возникшие напряжения воспринимаются водой и песчано-глинистым заполнителем, что приводит к потере равновесия рыхлообломочных пород и массовому вовлечению их в поток. При продвижении вниз по крутопадающему руслу происходит перемешивание воды и грунта и создается поток грязекаменной селевой массы» [148].

Первый же эксперимент в 1972 г. сорвал покров таинственности с одного из сложнейших и интереснейших природных процессов. Селевой вал достиг створа, в котором измерялся уровень грунтовых вод раньше, чем были отмечены какие-либо изменения в уровне грунтовых вод. А поскольку плотность селевой массы в этом створе составляла 2300–2400 кг/м^3, вывод был однозначным: формирование плотной селевой массы является результатом взаимодействия сосредоточенного водного потока с рыхлообломочными породами, вмещающими русло.

Как заметил впоследствии Ю. Б. Виноградов, «... в результате проведения экспериментов несколько модернизировались и взгляды автора, который ранее предполагал развитие в селевых очагах типа Мало-Алматинского, Чимбулакского и Чемолганского сдвигового селевого процесса, а не эрозионно-сдвигового, как это оказалось на самом деле» [149].

Данные экспериментов на Шамалганском полигоне, впоследствии подтвержденные результатами анализа следов прохождения катастрофических селей в различных регионах страны, свидетельствуют о том, что вещественный состав потоков в процессе селеформирования может изменяться в широких пределах: от воды до селевой массы, в которой объемное содержание воды не превышает (6±1) %. При этом реологические свойства селевой массы качественно изменяются: если вода является вязкой жидкостью, то плотная селевая масса, как правило, обладает ярко выраженными вязкопластическими свойствами.

Стало очевидным, что деление селей на структурные (ламинарные) и турбулентные носит условный характер, ибо режим движения потоков

определяется не генезисом селей, а реологическими свойствами селевой массы, морфометрией пути движения селей, их расходом.

Обработка результатов определения характеристик селей показала, что плотность селевой массы является сложной функцией уклона русла, его длины, вещественного состава селеформирущих пород, степени их консолидации и увлажнения и т.д. Это обстоятельство породило ряд принципиально важных вопросов, возникающих при проведении расчетов характеристик селей в целях обоснования селезащитных мероприятий.

Одним из них был вопрос о характере течения селевых процессов при изменении морфометрических характеристик пути движения селей, в частности будет ли селевая масса и далее обогащаться рыхлообломочными породами либо произойдет ее частичный распад или остановка. Первостепенная практическая значимость обоснованности ответа на этот вопрос послужила толчком для развития нового направления в изучении селевых явлений – разработки теории существования селевой массы (ключевого элемента теории трансформации характеристик селей).

Второй эксперимент по воспроизведению искусственных селей на Шамалганском полигоне проводился в 1973 г. Характеристики попусков воды из водохранилища приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6. Длительность и объем водных попусков, их максимальный расход

Год эксперимента	№ попуска	Продолжительность попуска, мин	Объем попусков, тыс. $м^3$	Максимальный расход попусков, $м^3/с$
1972	1	18,5	11,8	16,0
1973	1	2,5	1,7	16,2
	2	10,0	7,3	15,8
	3	9	5,3	12,1
	4	222,0	24,9	2,1

В отличие от эксперимента 1972 г., в ходе которого осуществлялся только один попуск воды, в 1973 г. были проведены три попуска воды с различными максимальными расходами. Кроме того, в главный селевой очаг поступала вода из трубчатого водовода на протяжении 222 мин.

Максимальные расходы воды в экспериментах 1972 и 1973 гг. отличались в пределах ошибок измерения (16,0 и 16,2 $м^3/с$). Объем водного попуска 1972 г. (11,8 тыс. $м^3$) также незначительно отличался от суммарного объема (без учета объема воды, поступавшей из трубчатого водовода после 28 мин от начала эксперимента) попуска 1973 г., равного 14,3 $м^3/с$.

Объем рыхлообломочных пород, вовлеченных в селеобразование в ходе описываемых экспериментов, существенно отличался. Так, объем рыхлообломочных пород, вовлеченных в селеобразование к 32 створу в 1972 г., составлял 24,2 тыс. $м^3$, а в 1973 г. – 87 тыс. $м^3$.

Необходимо учитывать, что в отличие от эксперимента 1972 г. селеформирующий попуск воды в 1973 г. сопровождался длительным

«хвостом» с максимальным расходом 2,1 $м^3/с$, образовавшимся вследствие неисправности затвора трубчатого водовода. Объем воды в «хвосте» оценен в 10 600 $м^3$.

Наблюдения за режимом рек Иле Алатау, отмостка русел которых формируется крупными фракциями морен, позволяют с очень высокой степенью достоверности утверждать, что водный паводок с расходом 2,1 $м^3/с$ не способен поддерживать селевой процесс на протяжении более 3 ч. Если предположить, что средняя плотность хвостовой части водного попуска имела плотность 1825 $кг/м^3$, то в ней содержалось около 12 800 $м^3$ рыхлообломочных пород (в рыхлом теле). Следовательно, к 32 створу в селеформирование было вовлечено 74 200 $м^3$ рыхлообломочных пород.

Таким образом, с учетом более длительного водного попуска 1973 г., по сравнению с попуском 1972 г., интенсивность вовлечения рыхлообломочных пород в процесс селеобразования в эксперименте 1973 г. в 2,5 раза превышала таковую в 1972 г.

Нетрудно подсчитать, что плотность селевой массы, образовавшейся к 32 створу в 1972 г., была близка к 1930 $кг/м^3$, а в 1973 г. – к 2200 $кг/м^3$.

Наиболее вероятным объяснением этому могут быть:

уменьшение числа крупных фракций, лежавших в прительвеговой зоне Шамалганского селевого очага в 1973 г. по сравнению 1972 г. (селей, способных «расчищать» селевой очаг от крупных фракций, скатывающихся в прительвеговую зону в ходе выполаживания бортов селевого очага, не было много десятков лет);

врезание русла, образуемого в ходе эрозионного воздействия селя 1973 г. на рыхлообломочные грунты селевого очага (результатом этого стало увеличение объема пород, находившихся выше поверхности селевого потока и вовлекавшихся в селевой процесс при их обрушении);

три водных попуска в эксперименте 1973 г. (каждый попуск воды приводил к формированию мощных «голов», в которых концентрировались крупные фракции, в результате чего значительно увеличивалась эродирующая способность селевой массы);

водные попуски в эксперименте 1973 г., в результате неисправности затвора трубчатого водовода, полностью не прерывались, что увеличивало расход водных попусков по сравнению с 1972 г.

Анализ результатов фото- и киносъемки, осуществлявшихся с помощью аппаратуры, установленной над потоком, показал, что содержание крупных фракций в селевой массе не было однородным. Значительное увеличение их наблюдалось в головных частях заново формировавшихся селей, а также в головных частях валов, образование которых происходило и при постоянных значениях водных попусков.

Средняя плотность селевой массы, формировавшейся во время водных попусков, составила 2120 $кг/м^3$. Максимальная плотность селевой массы оценена в 2300±100 $кг/м^3$ [150].

Наиболее мощный искусственный сель был воспроизведен в 1975 г. Изменение уровня воды в водохранилище и гидрографы водных попусков приведены на рисунке 5.11.

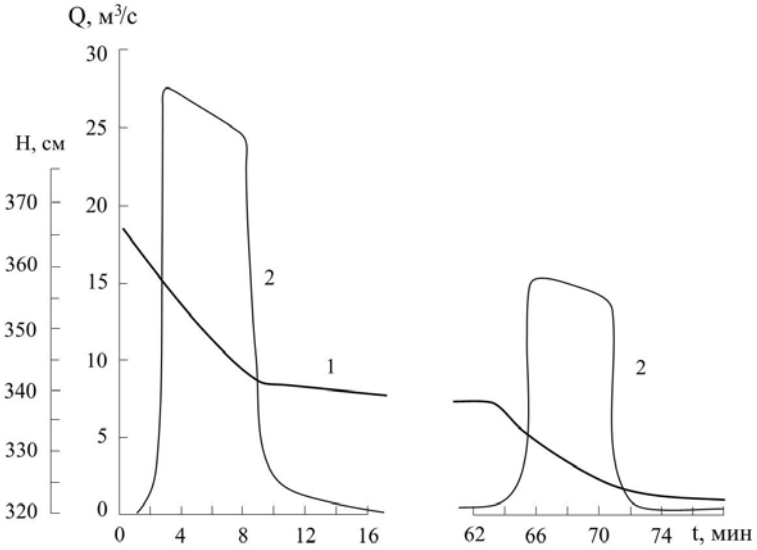


Рисунок 5.11. Уровень воды в водохранилище (*1*) и гидрограф попусков воды из водохранилища (*2*)

Изменение во времени расхода селя 1975 г. показано на рисунке 5.12. На этом же рисунке приведены данные об изменении магнитного поля, создаваемого твердым компонентом селевой массы, интерпретация которого совместно с информацией о размере и форме сечения потока в створе наблюдения позволяет оценить изменение плотности селевой массы. Некоторые данные о плотности селевой массы представлены на этом же рисунке.

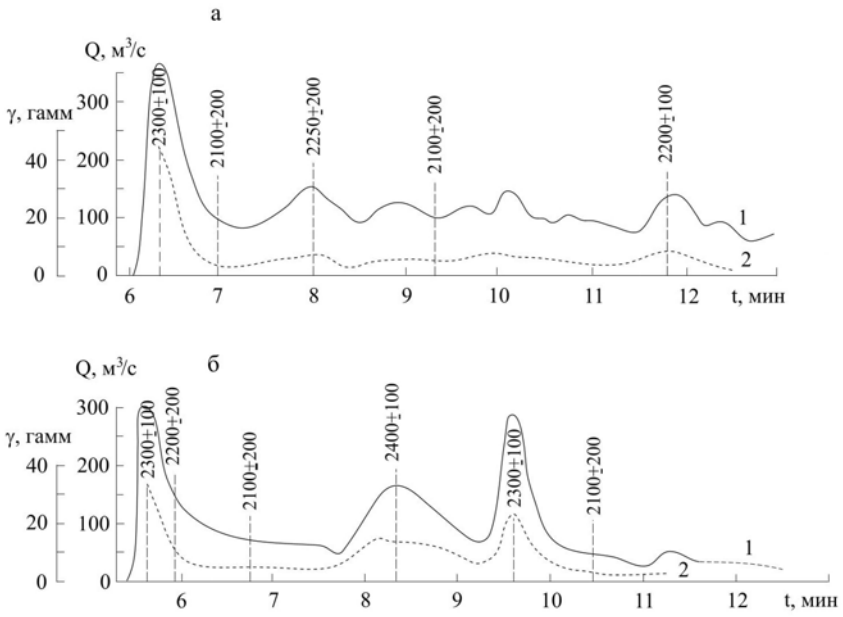


Рисунок 5.12. Изменение расхода селевого потока (*1*) и напряженности магнитного поля во времени (*2*). *а* – первый водный попуск; *б* – второй водный попуск

Графики площади размывов и отложений *S* и интегральная кривая объема выноса *W* твердого материала (в рыхлом теле) приведены на рисунке 5.13.

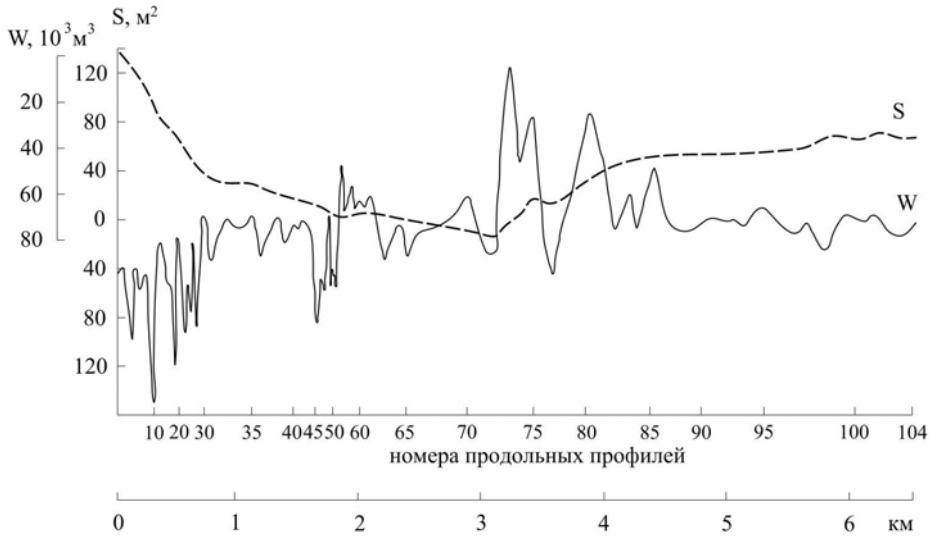


Рисунок 5.13. График площади размыва и отложений *S*
и интегральная кривая объема выноса *W* твердого материала (в рыхлом теле)

Одной из главных целей эксперимента по воспроизведению искусственного селя 1976 г. было определение минимального расхода водного потока (для условий Шамалганского селевого очага), при котором формируется сель с плотностью селевой массы, превышающей 2000 кг/м^3, и не образуется отмостка из крупных фракций, приводящая к затуханию селевого процесса. Было установлено, что такой расход близок к 5–6 м^3/с.

Для того чтобы исключить возможность остановки крупных фракций, обусловленной относительно малым уклоном селевого очага, в 1978 г. эксперименты были продолжены на крутых склонах древней морены. Уклон 100-метрового участка, к которому подводился водный поток, составлял 35–37°.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что в начальной фазе формирования русла (очага селеформирования) даже водный поток с расходом 0,1 м^3/с на 100-метровом участке пути движения трансформируется в сель с плотностью, близкой к 2100–2200 кг/м^3. При этом в составе селевой массы отсутствовали фракции, размер которых превышал 200 мм. Продолжение экспериментов показало, что, несмотря на появление в селевой массе более крупных частиц, средняя плотность селевой массы постепенно уменьшалась. Объяснялось это тем, что из-за малой величины расхода водного потока образующееся русло формировалось в зазорах между крупными фракциями грунта морены. Поскольку крупные фракции в ходе эрозионных процессов высвобождались от связей с вмещающими их грунтами лишь частично, несмотря на большие уклоны, в процесс селе-

формирования они не вовлекались. Условием, исключающим образование русла крупными частицами на больших уклонах, является наличие водных потоков, омывающих в ходе эрозионного процесса боковые поверхности крупных частиц. Следовательно, в первом приближении за критическое значение расхода водного потока можно принимать величину, при которой ширина потока в 2–3 раза превышает размеры наиболее крупных частиц, принимающих участие в формировании русла.

Совместный анализ данных, полученных при проведении экспериментов на Шамалганском полигоне в 1972–1976 гг. (материалы киносъемки, зафиксировавшей процесс трансформации водного потока в грязекаменный, геодезической съемки, выполненной до и после экспериментов, данные о гидрологической обстановке в селевом очаге, результаты измерений расхода водных потоков, поступавших в селевой очаг, и расхода селей, формирующихся в результате взаимодействия водного потока с рыхлообломочными породами, определения плотности селевой массы путем отбора проб и магнитометрическим способом), позволил сделать следующие выводы:

на уклонах, превышающих 16–18^{o}, взаимодействие сосредоточенных водных потоков (с расходом 6–25 м^3/с) с рыхлообломочными породами, состоящими из частиц с размерами от долей микрона до нескольких метров, а в минералогическом отношении представленных кислыми (80 %) и основными (20 %) породами, при длине селевого очага, близкой к 800 м, приводит к образованию селевой массы большой плотности (2000–2400 кг/м^3);

при определенных значениях плотности селевой массы, расхода и объема селей, морфометрии пути их движения вовлечение рыхлообломочных пород в селевые процессы и связанное с ним возрастание расхода и объема селей может происходить и на относительно малых уклонах – 3–6^{o};

рыхлообломочные породы вовлекаются в селеформирование в процессе размыва грунта потоком, сдвиг значительных по размерам массивов грунта, вследствие потери последними устойчивости, обусловленной увлажнением пород жидким компонентом селя, – маловероятное событие, так как скорость эрозионного углубления русла на порядки превышает скорость фильтрации; упомянутый сдвиг становится реальным, когда рыхлообломочные породы (в естественном залегании) обладают большой пористостью и насыщены водой, типичным примером может служить сдвиг водонасыщенных осыпей;

предельная плотность селевой массы определяется соотношением ее жидкого и твердого компонентов, минералогическим и гранулометрическим составами последних, расходом водных потоков и морфометрическими характеристиками пути их движения (для условий Иле Алатау предельные плотности селевой массы составляют 2400–2540 кг/м^3);

средние скорости перемещения жидкого и твердого компонентов селевой массы при плотности 2200–2400 кг/м^3 практически одинаковы;

валообразование в процессе формирования и движения селей – закономерная (не связанная с образованием заторов) особенность селевых процессов; причинами валообразования могут служить:

потеря устойчивости свободной поверхности потоков, аналогичная таковой, приводящей к волновому движению воды на быстротоках;

сдвиговые явления, возникающие при подрезке селем водонасыщенных склонов;

обрушение бортов селевого очага;

пульсации гидрографа водного потока, поступающего в селевой очаг и т.д.

Испытание селеметрической аппаратуры подтвердило эффективность принципов, положенных в основу бесконтактных способов измерения уровня, скорости и расхода селей, плотности селевой массы. Особую ценность, по нашему мнению, представляют данные о плотности селевой массы и расходе селей. В комплексе с материалами киносъемки и стереофотосъемки они позволили выявить и объяснить некоторые важные особенности течения селевых процессов, связанные с вовлечением рыхлообломочных пород в селеформирование и отложением твердого компонента селевой массы на относительно малых уклонах, образование береговых валов и выбросы глыб из потоков, остановку селей в различных ситуациях, оценить изменение расхода селей при постоянных и переменных характеристиках водных попусков.

5.2. Моделирование селей в лабораторных условиях

Высокая стоимость наблюдений за селевыми явлениями в натурных условиях (имеющих к тому же относительно малую повторяемость), большая трудоемкость работ, связанных с изменением характеристик селеформирующих факторов (продольного профиля и поперечного сечения русла, гранулометрического и минералогического составов, степени увлажненности и консолидации рыхлообломочных пород), обусловили создание лабораторных установок, позволявших моделировать некоторые элементы селевых процессов. Основная причина того, что полученные результаты экспериментальных наблюдений подчас не оправдывали ожиданий, заключается в том, что до настоящего времени отсутствуют критерии подобия, позволяющие с высокой степенью достоверности переносить данные моделирования на натуру. Однако даже если полученные результаты не представляют практической ценности, они могут послужить толчком к проведению дальнейших исследований.

5.2.1. Исследования ГрузНИИГиМ

В гидротехнической лаборатории ГрузНИИГиМ в 1961 г. была сооружена наиболее крупная экспериментальная установка, позволявшая проводить исследования всех видов потоков (водных, грязекаменных структурных, пульповых) и их взаимодействие с различными инженерными сооружениями.

Для экспериментов с грязекаменной массой предназначалась установка для дозировки твердого компонента и подготовки структурной селевой массы. Подготовленная в бетономешалке селевая масса накапливалась в

резервуаре емкостью 20 м^3, а затем подавалась в верхний бункер. В процессе заполнения бункера селевая масса подвергалась дополнительному перемешиванию. Из бункера селевая масса поступала в экспериментальные лотки (первый: длина – 16,5 м, ширина – 1 м, высота бортов – 0,5 м; второй: длина – 22,5 м, ширина – 1 м, высота бортов – 0,4 м), а затем вновь попадала в резервуар. Имевшиеся механизмы имели возможность пропустить через основной лоток до 40 м^3 селевой массы за 10 ч.

Во время опытов измерялась средняя скорость движения головной части потока. В ряде опытов измерялись поверхностные скорости не головной, а сформировавшейся части основного тела потока. После каждого опыта снимались поперечные и продольные профили отложенной селевой массы, что давало представление о дальности выноса селевой массы. В опытах уклон основного лотка изменялся от 0,08 до 0,19.

Объемный вес селевой массы (до разжижения) составлял 2160–2230 кг/м^3, вода в селевой массе до разжижения – от 8,85 до 10,3 % (по весу) от общей массы.

Кроме опытов по определению скорости движения потоков изучались движение структурных селей на поворотах, пропуск структурных и турбулентных селей через селеспуск, ударное воздействие структурного селя на поперечную преграду и др.

В проведенных опытах обломки камней с объемным весом 2650 кг/м^3 находились во «взвешенном» состоянии в растворе грязевой составляющей селевой массы с объемным весом в 1500–1700 кг/м^3. Исследования показали, что наибольшая часть «поддерживающей силы» в грязевой составляющей структурной селевой массы обусловлена «коллоидными» свойствами этой массы [151].

5.2.2. Исследования Геологической службы США

Поскольку результаты моделирования на незначительных по размерам установках (из-за масштабных эффектов) не могут непосредственно использоваться на практике, в Ванкуверской обсерватории Геологической службы США в конце прошлого столетия была разработана и изготовлена наиболее крупная и технически оснащенная установка, позволяющая моделировать некоторые элементы селевых процессов [152].

Установка состоит из:

смесителя, позволяющего создавать селевую массу с различной концентрацией твердого компонента и различным ее гранулометрическим составом;

накопителя селевой массы с объемом до 10 м^3;

затвора (ворот), позволяющего пропускать с заданным расходом селевую массу из накопителя в канал (лоток);

лотка длиной 80 м и шириной 1,2 м, продольный наклон которого близок к 31°;

площадки, наклоненной под углом 2,4° и примыкающей к концу лотка, на которой происходит остановка селевой массы;

разбрызгивателя, расположенного над лотком и позволяющего контролируемо увлажнять грунт, захватываемый потоком, образующимся при открытии затвора;

датчиков и регистрирующей аппаратуры, позволяющих измерять изменение во времени уровня и скорости потоков, влажности и плотности селевой массы, во время попусков проводилась непрерывная видеосъемка.

В качестве твердого компонента селевой массы использовались песчано-гравелистые и суглинисто-гравелистые смеси. Максимальная плотность селевой массы достигала 2400 кг/м^3.

В 2006–2013 гг. под руководством Р. Айверсона были проведены эксперименты в целях оценки природы и интенсивности вовлечения в селевой процесс рыхлообломочных пород, слагающих русло потока. Экспериментаторы сосредоточились на том, чтобы выяснить, при каких условиях рыхлообломочные породы вовлекаются в селевой процесс постепенно, а в каких – единовременно (всей толщей). В результате было установлено, что при увлажнении поверхностных слоев грунта его захват потоком происходит постепенно. При значительном увлажнении всего грунта возможен захват всей его толщи.

Было установлено, что интенсивность вовлечения грунта в процесс селеформирования в значительной мере зависит от степени его увлажнения. Влажный грунт легче эродируется и вовлекается в селевой процесс, чем сухой. Потоки, вовлекающие влажные грунты в селеобразование, движутся быстрее и могут пройти большее расстояние, чем потоки, взаимодействующие с сухими грунтами. Грунты вовлекаются в селеобразование порциями (по мере углубления русла) со скоростью 5–10 см/с.

Авторы экспериментов считают, что их модель по масштабу близка к натуре и поэтому результаты моделирования могут быть использованы при расчете характеристик реальных селей.

В последнем десятилетии особой популярностью пользовалось экспериментирование с моделями селевой массы в круговых лотках [4], по своим возможностям не отличающихся от кругового лотка, разработанного и изготовленного в 80-е годы прошлого столетия в КазНИГМИ для изучения реологических характеристик селевой массы, кинематических характеристик моделей селевых потоков и энергетических возможностей селевых потоков как взвесенесущих механизмов.

5.3. Моделирование заполнения селехранилищ вязкопластичной селевой массой

Селехранилища, образованные плотинами, являются важнейшим элементом противоселевой защиты в Казахстане. В то же время, будучи расположенными в непосредственной близости от защищаемых объектов, они могут стать источником повышенной угрозы, если при их проектировании, строительстве и эксплуатации допущены ошибки. Одна из таких ошибок может возникнуть при расчете емкости селехранилища.

Расчетный объем селехранилища, а следовательно, и стоимость его сооружения, при прочих равных условиях в решающей мере зависят от высоты

плотины и уклона поверхности селевой массы (уравнительного уклона), заполняющей селехранилище. Здесь необходимо остановиться на самом определении расчетной емкости селехранилища, поскольку в зависимости от режима заполнения перелив селевой массы через гребень плотины начинается при существенно различных ее объемах.

Большинство проектировщиков под расчетной емкостью селехранилища понимают максимальный объем селевых отложений, задерживаемых селехранилищем. При последовательном заполнении селехранилища отложениями селей, объем каждого из которых существенно меньше объема селехранилища, величина уравнительного уклона приближается к естественному бытовому уклону русла, существовавшего до строительства плотины. Расчетная емкость селехранилища при этом может оказаться впечатляющей даже при незначительной высоте плотины.

Совершенно иная ситуация наблюдается при разовом заполнении селехранилища селевой массой, обладающей ярко выраженными вязкопластическими свойствами. В этом случае перелив селевой массы через гребень плотины высотой несколько десятков метров начинается при уравнительном уклоне, близком к нулю, а задержанный объем селевой массы может оказаться намного меньше, чем рассчитанный по данным об уклоне русла выше селехранилища [153].

В 1986–1987 гг. в КазНИГМИ проводились эксперименты по моделированию заполнения селехранилищ вязкопластичной массой в масштабе 1:200 [154]. В результате было установлено, что обсуждаемый процесс достаточно сложен и в первом приближении состоит из двух фаз: движения потока до соприкосновения с плотиной и заполнения селехранилища. На рисунке 5.14 показаны этапы одного из экспериментов по заполнению модели селехранилища глинистым раствором. Время заполнения не превышало нескольких десятков минут, благодаря чему реологические характеристики глинистого раствора не претерпевали существенных изменений.

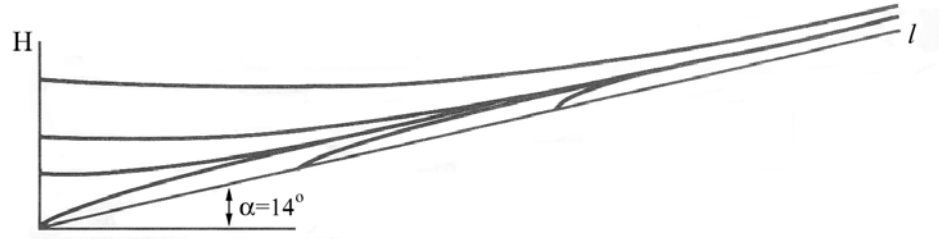


Рисунок 5.14. Заполнение модели селехранилища вязкопластичной массой

Если деформация в теле потока до его соприкосновения с плотиной происходила в основном в тонком слое на границе «поток – русло» (движение с ядром), то в процессе заполнения селехранилища имела место объемная деформация. Изложенное иллюстрируется рисунком 5.15, на котором приведены рисунки с фотограмм заполнения модели селехранилища вязкопластичной массой, в состав которой был введен отсек, отличавшийся от остальной массы только окраской.

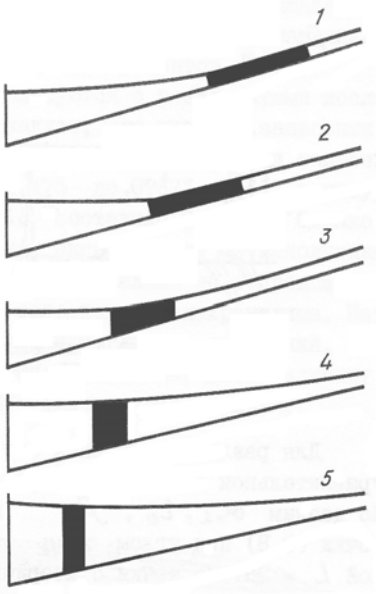


Рисунок 5.15. Изменение формы и положения в пространстве окрашенного отсека по мере заполнения модели селехранилища вязкопластичной массой

Полученные данные свидетельствовали о том, что при плотности и предельном напряжении сдвига селевой массы, типичной для селей, формирующихся на северном склоне Иле Алатау, продольный уклон поверхности селевых отложений в селехранилищах на глубинах более 40–50 м не будет превышать 1º. Результаты моделирования способствовали разработке математической модели заполнения селехранилищ, описанной ниже.

5.4. Моделирование формирования конуса выноса

Исследованиями, проводившимися в КазНИГМИ в 90-х годах прошлого столетия в целях выявления роли селей в процессах рельефообразования, установлено, что сели являются одним из важнейших факторов образования как положительных, так и отрицательных форм рельефа. Результаты изучения механизмов образования конусов выноса, образуемых отложением аллювия и селевой массы на предгорной равнине, показали, что упомянутые механизмы существенно отличаются.

Аллювий перемещается по поверхности конуса выноса за счет энергии водного потока во взвешенном состоянии, сальтацией и качением. Большая часть пылевато-глинистых фракций при этом выносится во взвешенном состоянии за пределы конуса выноса, а остальные частицы распределяются по поверхности конуса выноса. Благодаря этому уклон конуса выноса практически одинаков от предвершинной зоны до зоны сочленения конуса с предгорной равниной. Следствием этого является форма горизонталей на топографических картах, представляющая собой окружности с центром, расположенным на выходе реки из гор.

Образование большого аллювиального конуса выноса происходит равномерно на протяжении многих сотен тысяч лет, если не претерпевает резких изменений вследствие тектонических процессов.

Сказанное иллюстрируется рисунком 5.16, на котором приведена фотография одного из этапов моделирования формирования аллювиального конуса выноса.

Рисунок 5.16. Моделирование образования аллювиального конуса выноса

Незначительная неравномерность вызывается внутригодовыми сезонными процессами и изменениями степени увлажнения почвогрунтов речного бассейна, обусловленными метеорологическими процессами различной длительности.

Благодаря наличию у селевой массы свойства пластичности сель расплывается по поверхности конуса выноса весьма ограниченно и «компактным» (без существенного изменения гранулометрического состава селевой массы) потоком может продвигаться вплоть до периферийной части конуса выноса. После остановки селя и обезвоживания селевой массы на поверхности конуса выноса остается приподнятая, практически на глубину потока (определяемую уклоном конуса выноса, плотностью селевой массы и ее предельным напряжением сдвига), полоса селевых отложений. Вследствие этого вероятность, что последующий сель будут перемещаться по поверхности предыдущего, близка к нулю. Он сместится вправо (влево) от упомянутой полосы отложений. Последующие сели относительно равномерно перекроют поверхность конуса выноса на всех 180^{o} сектора отложений.

Но это идеальный вариант. В реальных условиях сектор, в котором формируется селевой конус выноса, ограничен. Так, угол сектора, занимаемого конусом выноса р. Улькен Алматы, равен примерно 50°, р. Киши Алматы – 45°, р. Талгар – 85°, р. Есик – 90°, р. Турген – 60° и р. Шелек (аллювиальный конус) – 120°. Ограничивающими элементами могут быть в

данных ситуациях верхняя и нижняя предгорные ступени, конусы выноса соседних речных бассейнов и т.д.

Поскольку поверхность конуса выноса не ровная, в процессе движения селя из крупных глыб могут сформироваться естественные отклоняющие дамбы, на пути движения потоков могут оказаться отложения предшествовавших селей и т.д.; при встрече с ними водный поток и сель ведут себя по-разному.

Так, водный поток, обогнув препятствие, потечет по пути максимального уклона, а сель продолжит движение (в направлении, заданном препятствием) в канале, боковые стенки которого образуются при растекании селевой массы перпендикулярно продольному движению потока.

Способность грязекаменного селя создавать себе «канал» на поверхности конуса выноса, передвигаться на уклонах, меньших, нежели это определяется положением горизонталей, приводит к тому, что вероятность отложения селевой массы при смещении потока от осевой линии конуса выноса увеличивается.

С удалением от вершины конуса выноса кривизна горизонталей уменьшается быстрее, чем возрастает расстояние от вершины конуса выноса до соответствующей горизонтали. На рисунке 5.17 приведены фотографии, иллюстрирующие различные этапы формирования модели селевого конуса выноса и позволившие объяснить природу уменьшения кривизны горизонталей по мере их удаления от вершины конуса выноса, сложенного в основном селевыми отложениями [66].

Результаты изучения строения конусов выноса, а также механизмов их формирования показали, что форма поверхности конусов выноса, сложенных аллювием, принципиально отличается от формы конусов выноса, образованных в основном селевыми отложениями. Периферийные горизонтали конусов выноса, выполненных в основном селевыми отложениями, в отличие от аллювиальных, если их аппроксимировать окружностями, имеют радиусы большие, чем расстояние от вершины конуса выноса до соответствующей горизонтали в осевом направлении. В некоторых ситуациях кривизна периферийных горизонталей принимает обратное направление [52]. Другим существенным отличием в форме горизонталей конусов выноса являются практически равные расстояния между горизонталями как на вершине конуса выноса, так и на его периферии у конусов выноса аллювиального генезиса и существенно различные – у конусов выноса, образованных в основном селевыми отложениями. Указанные отличия позволяют выявлять на топографической карте территории, подверженные разрушительному воздействию селей. Объем конусов выноса характеризует относительную селевую активность бассейнов горных рек в плейстоцене. При наличии в стратиграфических разрезах конусов выноса опорных горизонтов, свидетельствующих о резком изменении климата, появляется и возможность оценки изменения селевой активности в межледниковых эпохах последнего ледникового периода.

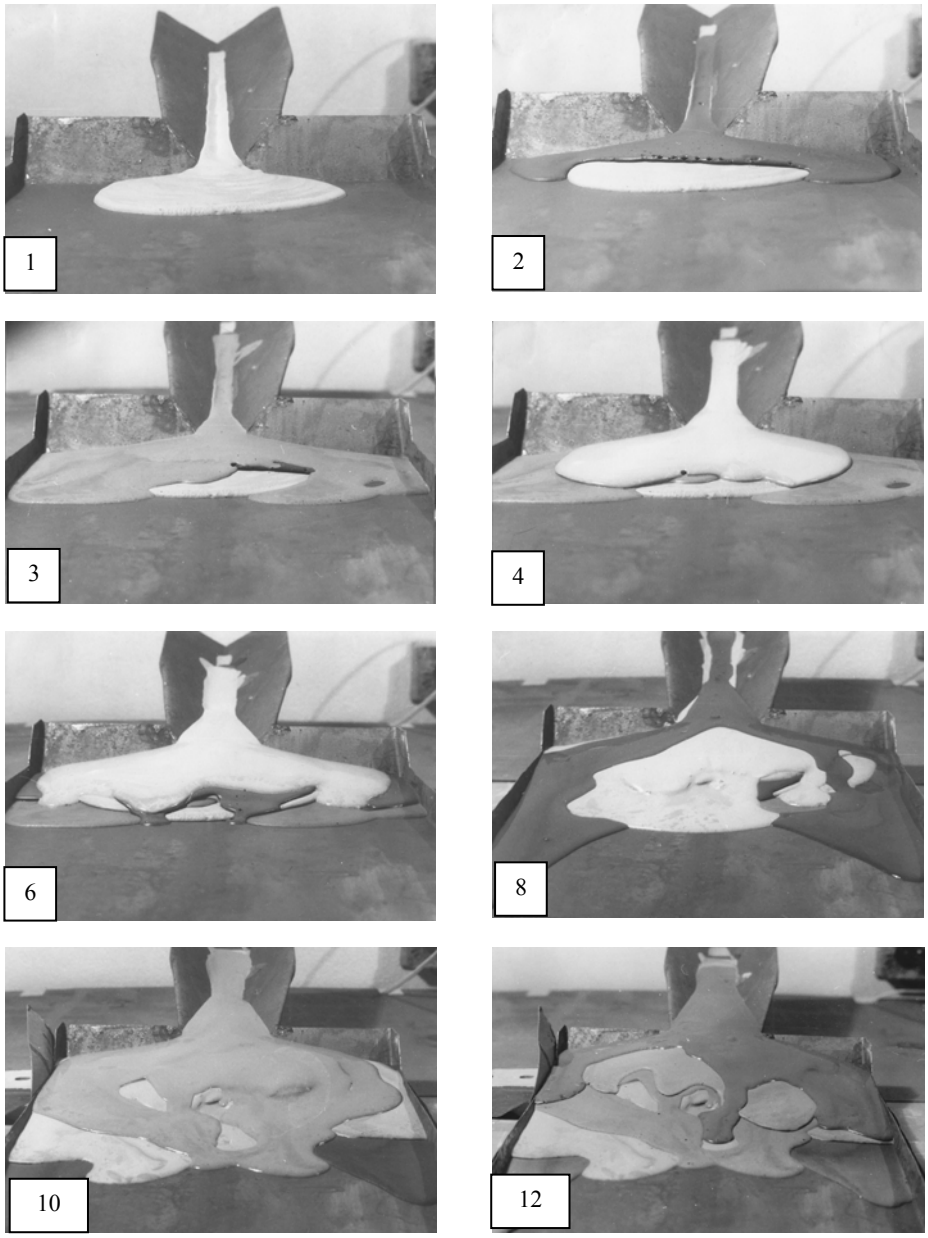


Рисунок 5.17. Конус выноса после первого (*1*), второго (*2*), третьего (*3*), четвертого (*4*), шестого (*6*), восьмого (*8*), десятого (*10*) и двенадцатого (*12*) экспериментов

5.5. Математическое моделирование селевых процессов. «Гидравлические» модели трансформации селей

Для описания трансформации характеристик селей привлекаются так называемые «гидравлические» модели, используемые преимущественно для расчета характеристик лавин, оползней и обвалов. В этих моделях

селевые процессы рассматриваются с позиций механики многофазных сред, что позволяет применять методы и приемы, разработанные в гидромеханике и механике грунтов [155–157]. По данным А. К. Дюнина [157], система уравнений, описывающих движение такой среды, состоит из нескольких десятков нелинейных дифференциальных уравнений, решение которых представляет значительные трудности не только аналитически, но и численными методами. Применение строгих систем уравнений ограничивается и отсутствием или недостаточной точностью информации, необходимой для постановки начальных и граничных условий, а также оценки коэффициентов, входящих в уравнения.

Это вынуждает довольствоваться упрощенными моделями, в частности к описанию движения селя подходят с позиции механики сплошной гомогенной среды. Гидравлические модели движения потоков лавинного типа (снежных лавин, оползней, обвалов) широко известны. Их описание и результаты верификации приведены в работах С. С. Григоряна, А. К. Дюнина, В. М. Лятхера, Т. Г. Войнич-Сяноженцкого, Ю. М. Денисова, А. В. Остроумова, О. Г. Натишвили, В. И. Тевзадзе, В. Г. Санояна и др.

5.5.1. Модель М. К. Такабаева и Г. М. Тныштыкбаевой

В Казахстане одна из таких моделей предложена М. К. Такабаевым и Г. М. Тныштыкбаевой [158]. Движение селя уподобляется течению гипотетической несжимаемой жидкости, подверженной действию силы тяжести, сил внутреннего и кулоновского трения [155]. Искомыми характеристиками являлись распределение скоростей и глубин потока во времени и пространстве, а также максимального расхода селя на примере селя 1977 г. на р. Улькен Алматы. Исходными данными были коэффициенты кулоновского трения, турбулентного сопротивления, а также сдвиговая прочность контакта «склон – поток», подсчитанная по приближенным формулам, предложенным С. С. Григоряном. Значения этих характеристик уточнялись путем многократного пересчета и сравнения с наблюденными данными. В результате моделирования получены данные, свидетельствующие о неплохой сходимости упомянутых расчетных и натурных характеристик селя.

К недостаткам моделирования следует отнести допущение ее авторов о постоянстве плотности селевой массы (2200 кг/м^3), в то время как ее плотность изменялась от 1000 до 2400 кг/м^3, предположение о мгновенном прорыве озера и применение нового закона трения С. С. Григоряна при формировании селей в условиях Иле Алатау. Экспериментами на Шамалганском полигоне доказана ведущая роль эрозии в вовлечении рыхлообломочных пород в селевой процесс. Оказалось невыясненным и влияние «… многократного пересчета …» на результаты расчета: для этого необходимо провести моделирование на примере селей в других физико-географических условиях.

5.5.2. Модель А. И. Квасова

Модель С. С. Григоряна и А. В. Остроумова лежит в основе и модели А. И. Квасова, которая отличается от нее членами уравнения, учитывающими «… поступление материала с бортов русла и влияние этого дополнительного материала на инерционные силы и процесс движения …» [159]. Рассматривается процесс, в соответствии с которым лежащий в лотке (с постоянным уклоном) увлажненный массив рыхлообломочных пород мгновенно превращается в жидкость (сдвиговый процесс) и начинает двигаться. Устойчивый режим движения предопределялся захватом или отсутствием захвата (фронтальной частью потока) рыхлообломочных пород. В случае захвата массы прерывная волна приобретала четко выраженный фронт, в противном случае поток постепенно и плавно растекался и останавливался. Появление дополнительного притока вызывало образование «горба», который после слияния с остановившейся массой формировал еще большую волну и т.д.: «… Небольшой по своим параметрам поток может превратиться в более мощный и дальнобойный, а большой сель – в катастрофический» [159]. Проверка модели осуществлялась на примере селя 1973 г. на р. Киши Алматы. Подбор коэффициентов в уравнениях позволил получить приемлемые результаты при расчете объема селя и его скорости при входе в селехранилище, а также среднего уклона поверхности отложений в селехранилище. По мнению А. И. Квасова, «… принятая схема комбинирования экспериментов и численного моделирования может быть использована для оценки параметров грязекаменных селей в рамках предлагаемой модели» [159].

Селевая масса представляет собой трехкомпонентную среду, характеризующуюся сложным взаимодействием этих компонентов во время ее движения. Строгое математическое описание процессов образования, движения и остановки (распада) селевой массы невозможно из-за их сложности и отсутствия исходной информации. В настоящее время в практике расчета характеристик селей, необходимых при обосновании противоселевых мероприятий и проектировании селезащитных сооружений, наибольшее применение находят модели, в которых необходимые параметры и характеристики известны либо могут быть измерены с помощью стандартизированных средств измерений.

5.5.3. Модель Ю. Б. Виноградова

Принимая за условие равновесия массива рыхлообломочных пород равенство удерживающих и сдвигающих сил, Ю. Б. Виноградов [18] находит критическое значение глубины слоя воды, стекающего в толще пород по водоупору β (в долях мощности отложений Z).

Сдвигающее напряжение определяется из выражения

$$\sigma(+) = gZ\left\{\rho_{\text{Т}}(1-\varepsilon) + \rho_o\left[\beta\varepsilon + (1-\beta)\theta_o\right]\right\}\sin\alpha\cos\alpha\,, \qquad (5.1)$$

удерживающее напряжение – из выражения

$$\sigma(-) = gZ\left\{\rho_{\text{т}}(1-\varepsilon) - \rho_o\left[\beta(1-\varepsilon) - (1-\beta)\theta_{\text{o}}\right]\right\} tg\varphi\cos^2\alpha + C_{гр}, \quad (5.2)$$

где Z – толщина (по вертикали) слоя рыхлообломочных отложений, м; ε – пористость породы, доли ед.; $\rho_{\text{т}}$ и ρ_o – плотность рыхлообломочной породы и воды, кг/м^3; θ_{o} – объемная влажность породы, доли ед.; β – глубина слоя воды, стекающей в толще породы по поверхности водоупора, доли Z; α – угол наклона дна ложбины, град; φ – угол внутреннего трения породы, град; $C_{гр}$ – сцепление породы, Н/м^2 (два последних показателя – при полной влагоемкости).

Принимая во внимание, что $\gamma_\theta = \rho_T(1-\varepsilon) + \rho_o\theta_o$,

$$\beta = \frac{\left[\frac{\rho_{\text{т}}}{\rho_o}(1-\varepsilon) + \theta_o\right]\left(\frac{tg\varphi}{tg\alpha} - 1\right) + \frac{C_{гр}}{\rho_o g Z \sin\alpha\cos\alpha}}{\varepsilon - \theta_o + \left[1 - (\varepsilon - \theta_o)\right]\frac{tg\varphi}{tg\alpha}}. \quad (5.3)$$

Потеря склоном устойчивости не означает неизбежность формирования селя, так как степень заполнения пор водой (суспензией) может оказаться недостаточной для приведения грунта в текучее состояние. О качественных характеристиках образующихся смесей можно судить по результатам анализа, осуществляемого с помощью уравнений (5.1)–(5.3).

5.5.4. Модель Б. С. Степанова и И. Г. Цукермана

Вязкопластические свойства селевой массы могут создавать условия, благоприятствующие продвижению селей на участках с малыми продольными уклонами, и останавливаться практически не распадаясь. М. С. Гагошидзе, анализируя данные ряда авторов, а также результаты своих наблюдений, пришел к выводу, что структурные грязекаменные потоки характеризуются устойчивостью в сохранении принятого на выходе из ущелья направления. Один из приведенных им примеров свидетельствует, что «… сель двигался по выходе из ущелья в широкой пойме 1000–1500 м, прямолинейной полосой шириной лишь 30–40 м и высотой 3–4 м на протяжении 13 км» [151]. Этот факт позволяет при разработке модели рассматриваемого типа селей ограничиться использованием системы двух координат.

Предельное напряжение сдвига селевой массы, обладающей большой плотностью, составляет от нескольких десятков до нескольких тысяч паскалей. Предполагая, что в момент остановки селевой массы основными силами, определяющими состояние потока, являются сила тяжести и сила пластического сопротивления, а также принимая во внимание результаты выполненных в ГрузНИИГиМ и КазНИГМИ опытов по оценке коэффициента бокового давления в селевой массе, свидетельствующих о том, что эта величина близка к единице, запишем уравнение предельного равновесия пластичной среды, находящейся на наклонной плоскости (рисунок 5.18), в виде

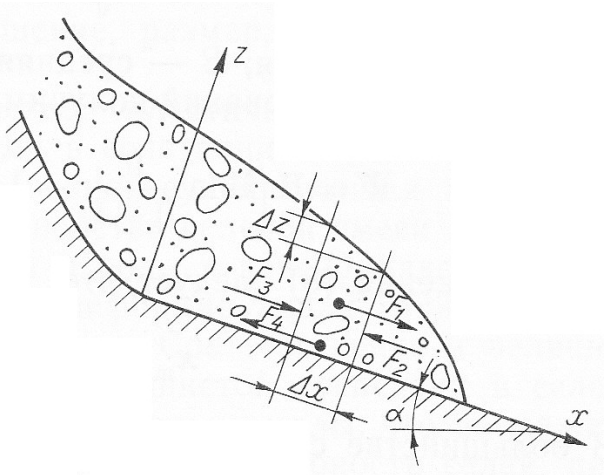


Рисунок 5.18. Тело селевого потока на конусе выноса:
F_1 – сдвигающая сила, обусловленная весом элемента тела;
F_2, F_3 – результирующие сил давления; F_4 – удерживающая сила

$$\Pi + Z\left(\frac{\partial Z}{\partial X} - 1\right) = 0\,, \tag{5.4}$$

где $\Pi = \dfrac{\tau_{см}}{\rho_{см} g z_o \sin\alpha}$; $Z = \dfrac{z}{z_o}$; $X = \dfrac{xtg\alpha}{z_o}$; $\tau_{см}$ – начальное напряжение сдвига селевой массы, Н/м^2; $\rho_{см}$ – плотность селевой массы, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; z_o – глубина потока в начале координат, м; α – угол наклона плоскости, град; x, z – координаты поверхности селевой массы.

Уравнение (5.4) записано в системе координат, у которой плоскость xOy совпадает с наклонной плоскостью, а начало координат находится в некотором створе, выше которого наблюдается значительное увеличение уклона селевого русла. Ось Ox направлена по движению потока и лежит в его плоскости симметрии. На рисунке 5.18 показан фрагмент тела селя, движущегося по наклонной плоскости, представлена принятая система координат и указаны силы, действующие на один из элементов потока: $F_1 = z\rho_{см} g \sin\alpha \Delta x$; $F_3 - F_4 = z\rho_{см} g \cos\alpha \dfrac{\partial z}{\partial x}\Delta x$, где $\dfrac{\partial z}{\partial x} < 0$; $F_4 = -\tau\Delta x$.

Значения П, X, Z являются критериями подобия состояния пластичной среды, а уравнение (5.4) может рассматриваться как дифференциальное уравнение этих критериев. Интегральная кривая этого уравнения с учетом условия, что Z=1 при X=0, имеет вид

$$X = \Pi \ln\left|\frac{\Pi - Z}{\Pi - 1}\right| + Z - 1\,. \tag{5.5}$$

Из выражения (5.5) может быть определена дальность выброса селя. Если принять, что Z=0, то получим выражение

$$X_{\max} = \Pi \ln \frac{\Pi}{\Pi - 1} - 1. \qquad (5.6)$$

Из формулы (5.6) следует, что дальность селевого выброса определяется значением критерия *П*. Если к створу *X*=0 селевой поток подходит с расходом, при котором *П*→1, то дальность выброса может быть значительной, а теоретически для рассматриваемой модели неограниченной. Увеличение критерия *П* вызывает остановку селевой массы. Это должно приводить к тому, что при волнообразном характере движения потока перемещение его фронта может происходить с остановками. Такое явление отмечалось наблюдателями во время прохождения в долине р. Улькен Алматы потока грязекаменной массы большой плотности в августе 1977 г. Заметим, однако, что наблюдавшееся явление могло иметь место и по другим причинам.

Факт продвижения селя на конусе выноса узкой полосой может также найти объяснение с помощью рассматриваемой модели. Для этого необходимо рассмотреть равновесное положение селевой массы вдоль оси *Oy*. Уравнение равновесия сил для этого случая имеет вид

$$\Pi^* = Z^* \frac{\partial Z^*}{\partial Y'}, \qquad (5.7)$$

где $Y = \frac{y}{z_o(x)}$; $\Pi^* = \frac{\tau_{см}}{\rho_{см} g z_o(x)}$; $Z^* = \frac{z}{z_o(x)}$; $z_o(x)$ – толщина слоя селевой массы в створе *x*, измеренная в плоскости симметрии потока.

Решением этого уравнения при условии, что $Z^*=1$ при $Y=0$, является выражение

$$Z^* = \sqrt{1 - 2\Pi^* Y}. \qquad (5.8)$$

Формулу (5.8) при z=0 можно записать

$$y_{\max}(x) = \frac{\rho_{см} g z_o^2(x)}{2\tau_{см}}. \qquad (5.9)$$

Используя выражение (5.9), можно оценить величину растекания потока в поперечном направлении.

При z_o=3 м, $\tau_{см}=6\cdot10^3$ Н/м^2, $\rho_{см}=2\cdot10^3$ кг/м^3 и g=9,8 м/с^2 значение y_{max} будет составлять 15 м. Таким образом, при указанных характеристиках селевой массы максимальная ширина потока составит всего 30 м. Если предложенные значения подставить в формулу (5.6), то при $\alpha=6^o$ дальность выброса при условии, что селевая масса к начальному створу будет подходить непрерывно, становится неограниченной.

Формула (5.6) позволяет оценить максимальную дальность выброса селя, если задано значение z_o. На практике возможный объем селевого выброса удобней задавать. В связи с этим необходимо установить связь между этими величинами. Для этого вычислим интеграл

$$w = \int X dZ = \frac{tg\alpha}{z^2 B} W, \qquad (5.10)$$

где B – средняя ширина потока; W – объем селя.

После преобразований получим

$$w = \Pi\left(\Pi \ln \frac{\Pi}{\Pi - 1} - 1\right) - \frac{1}{2} = \Pi X_{\max} - \frac{1}{2}. \quad (5.11)$$

Из выражения (5.10) следует, что

$$x_{\max} = \frac{1}{\Pi}\left(\frac{W}{Bz_o} + \frac{z_o}{2tg\alpha}\right). \quad (5.12)$$

В большинстве случаев продвижение грязекаменного селевого потока происходит, когда в начальном створе $П \to 1$. Это условие позволяет записать формулу (5.11) в виде, удобном для расчетов:

$$x_{\max} = \frac{W\rho_{см} g \sin\alpha}{B\tau_{см}} + \frac{\tau_{см}}{2\rho_{см} g \sin\alpha tg\alpha}. \quad (5.13)$$

Если предположение, что $П \to 1$ вызывает сомнение, то для определения дальности выброса необходимо каким-либо способом разрешить уравнение (5.11) относительно z_o и затем подставить найденное значение в формулу (5.12). В тех случаях, когда вторым членом в уравнении (5.13) можно пренебречь, для определения дальности выброса получаем тривиальную формулу

$$x_{\max} = \frac{W\rho_{см} g \sin\alpha}{\tau_{см} B}. \quad (5.14)$$

Значение B можно принять равным средней ширине участка долины выше начального створа.

Полученные формулы могут быть использованы для оценки дальности выброса потока грязекаменной массы, предельное напряжение сдвига которой (обусловленное свойством пластичности селевой массы) превышает 100 Н/м^2.

5.5.5. Модель заполнения селехранилищ

Определение уклона уравнительной поверхности селевых отложений в селехранилище привлекало внимание исследователей не только потому, что этот уклон в значительной мере определял стоимость селезащитных сооружений, но и от правильности его определения зависит безопасность людей.

В отличие от жидкости, обладающей текучестью вследствие того, что в покоящемся состоянии она не способна сопротивляться внутренним касательным напряжениям (т.е. усилию, действующему вдоль поверхности сдвига) и поэтому принимает форму сосуда, селевая масса, как правило, обладает вязкопластическими свойствами и деформируется лишь в тех случаях, когда действующее на нее напряжение превышает величину предельного напряжения сдвига, присущую селевой массе. Если при заполнении селехранилища водой она (под действием своего веса) растекается, образуя горизонтальную (точнее, уровенную) поверхность, то селевая

масса, обладающая вязкопластическими свойствами, формирует так называемую уравнительную поверхность, которая может существенно отличаться от уровенной.

Уравнение, описывающее действие сил в момент остановки селя, когда основными силами, определяющими состояние потока, являются сила тяжести и пластического сопротивления, приведено в работе [160]. Его решение хорошо описывает поверхность пластической среды, залегающей на наклонной плоскости, а также когда угол наклона плоскости равен нулю. Однако использование этого уравнения для описания уравнительной поверхности селевых отложений дает отрицательные результаты. Важную роль в описании уравнительной поверхности сыграло экспериментальное доказательство того, «… что формирование уравнительной поверхности происходит в условиях непрерывной объемной деформации массы, задержанной плотиной ...» [161].

Однако уравнение, описывающее уравнительную поверхность селевых отложений в селехранилище, приведенное в работе [161], не в полной мере отражает физические процессы, происходящие при заполнении селехранилища вязкопластичной селевой массой.

Форма уравнительной поверхности селевых отложений в селехранилище определяется равенством сдвигающих и удерживающих сил. В простейшей, наиболее часто встречающейся ситуации, когда дно селехранилища аппроксимировано наклонной плоскостью, а угол его наклона 0–5º, влиянием напряжения, затрачиваемого на объемную деформацию, можно пренебречь, поскольку оно не будет превышать погрешность, связанную с определением предельного напряжения сдвига селевой массы (рисунок 5.19).

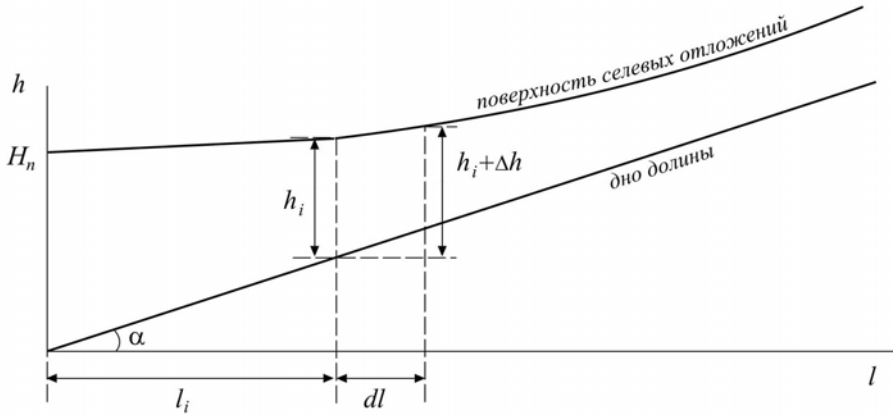


Рисунок 5.19. К выводу уравнения, описывающего уравнительную поверхность селевых отложений в селехранилище

С учетом сказанного уравнение, описывающее продольный профиль уравнительной поверхности селевых отложений в селехранилище, имеет вид

$$\rho_{см} g \left[\frac{1}{2} \left(H_n - l_i tg\alpha + dh \right)^2 - \frac{1}{2} \left(H_n - l_i tg\alpha \right)^2 \right] \cos\alpha = \tau_{см} dl. \qquad (5.15)$$

Поскольку на практике $\cos\alpha \approx 1$, то

$$\rho_{см} g dh \left(H_n - l_i tg\alpha \right) = \tau_{см} dl \tag{5.16}$$

$$dh = \frac{\tau_{см} dl}{\rho_{см} g \left(H_n - l_i tg\alpha \right)}, \tag{5.17}$$

где $\rho_{см}$ – плотность селевой массы, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; H_n – глубина отложений в створе плотины, м; l_i – расстояние от плотины, м; α – продольный уклон дна селехранилища, град; h_i – текущее значение мощности отложений в селехранилище, м; $\tau_{см}$ – предельное напряжение сдвига селевой массы, Н/м^2.

Решение этого уравнения:

$$h_i = -k \ln\left| H_n - l_i tg\alpha \right| + C, \tag{5.18}$$

где $k = \dfrac{\tau_{см}}{\rho_{см} g tg\alpha}$; C – постоянная интегрирования.

Если $l_i = 0, \quad h_i = H_n$, то $C = H_n + k \ln\left| H_n \right|$.

Поскольку соотношение между селевой массой и суммой удерживающих сил по мере удаления от плотины уменьшается, равенство сдвигающей и удерживающих сил обеспечивается изменением (увеличением) угла наклона уравнительной поверхности. Если длина отложений в селехранилище соизмерима с мощностью разового отложения селя, учет напряжений, обусловливающих объемную деформацию селевой массы, становится необходимостью. Это обстоятельство с приемлемой погрешностью может быть учтено введением поправочного коэффициента $k_1=1+3sin\alpha$ в формулу (5.18):

$$h_i = -kk_1 \ln\left| H_n - l_i tg\alpha \right| + C. \tag{5.19}$$

Оценка достоверности результатов моделирования заполнения селехранилища вязкопластичной селевой массой, характерной для Иле Алатау, проводилась путем их сравнения с данными топографической съемки, проведенной после того, как произошла консолидация отложений селя 1973 г. Данные съемки и расчетов представлены в таблице 5.7. Если учесть, что на следующий день после прохождения селя 15 июля 1973 г. имел место выброс селя с объемом около 500 тыс. м^3, т.е. заполнение селехранилища не было разовым, результаты теоретических расчетов удовлетворительно совпадают с данными натурных наблюдений. Не исключено, что имеющееся расхождение в значительной мере обусловлено неверно заданным значением предельного напряжения сдвига (2000 Н/м^2).

Наиболее типичные предельные напряжения сдвига селевой массы, формирующейся при взаимодействии водного потока с селеформирующими породами, составляют 500–5000 Н/м^2 (при плотности селевой массы около 2350–2400 кг/м^3). При таких значениях предельного напряжения сдвига, уклонах русел, сопрягающихся с селехранилищами и равных 0,05–0,07, и глубинах селевых отложений в селехранилищах, больших 10 м, уклон уравнительных поверхностей близок к нулю.

Таблица 5.7. К определению уклона уравнительной поверхности

Способ оценки наклона уравнительной поверхности		Интервалы, в которых определялся уклон уравнительной поверхности, м			
		0-360	360-460	460-563	563-764
Топографическая съемка, сель 1973 г.	Угол наклона	0º21′	0º38′	1º14′	1º55′
Расчет по формуле (5.18)		0º16′	0º32′	0º59′	1º35′

В ситуациях, когда максимальная глубина селевых отложений в створе плотины незначительно отличается от ширины селехранилища, аналитическое определение емкости селехранилища осложняется настолько, что оценить его емкость проще путем физического моделирования. Для этого необходимо соблюдать следующий критерий подобия: $\frac{\tau_{см}}{\rho_{см} g H} = \text{const}$.

Имеющиеся данные однозначно свидетельствуют о правильности положений СН 518-79 [162], в которых априори уравнительный уклон селехранилищ, создаваемых глухими плотинами, принимался равным нулю. Следовательно, при оценке степени защищенности объектов от воздействия селей следует принимать во внимание емкость селехранилища при горизонтальной поверхности отложений.

Существенное изменение характера уравнительной поверхности наблюдается лишь в ситуациях, когда сила сопротивления, обусловленная кулоновским трением, становится соизмеримой (или превышающей) с силой пластического сопротивления. Роль кулоновского трения при заполнении селехранилищ проявляется лишь в результате частичного распада селевой массы, сопровождающегося образованием опирающегося на дно каркаса из крупных фракций твердого компонента селевой массы, или вследствие частичного оттока суспензии из селевой массы, обусловленного особенностями конструкции селехранилищ. При этом изменяется механизм заполнения селехранилищ: объемная деформация тела селя прекращается и заполнение носит послойный характер. Математическое описание такого процесса осложняется его нестационарностью и существенным влиянием случайных факторов.

Содержание главы 5 не претендует на всеобъемлющий обзор состояния моделирования селевых процессов. При написании авторы стремились лишь только осветить основные его направления. К сожалению, оценить результаты моделирования в настоящее время не представляется возможным из-за практически полного отсутствия сведений о погрешности, с которой оно осуществлялось.

Глава 6

ОСНОВНЫЕ КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЕЛЕВОГО ПОТОКА

6.1. Кинематические характеристики селевого потока

Особенностью перемещения твердого компонента в составе грязекаменного селя является равномерность распределения твердых частиц по глубине селевого потока. Причинами такого распределения могут служить турбулентное перемешивание селевой массы, ее вязкопластические свойства, наличие постоянного контакта между частицами и руслом.

Если селевая масса обладает вязкопластическими свойствами, достаточными для поддержания твердого компонента в квазивзвешенном состоянии, а максимальный размер твердых частиц значительно меньше глубины селевого потока, равномерное распределение твердого компонента по сечению селевого потока наблюдается и при движении селя, носящего характер, близкий к ламинарному. Если же вязкопластические свойства у селевой массы слабо выражены, а постоянный контакт между твердыми частицами отсутствует, равномерность концентрации твердых частиц в селевом потоке поддерживается только за счет перемешивания селевой массы. Перемешивание селевой массы может обусловливаться турбулентным характером движения селевого потока, кинематическими особенностями движения крупных частиц твердого компонента селевой массы, взаимодействием селевого потока с элементами шероховатости русла.

Важнейшей характеристикой движения селевого потока является скорость. Скорость селевого потока определяется режимом движения, свойствами селевой массы, а также морфометрическими характеристиками русла. Структура селевой массы чрезвычайно сложна, она непрерывно изменяется по мере движения селевого потока, поэтому, как отмечал Ю. Б. Виноградов, «... попытка дать полноценное физико-статистическое описание ее движения и оценить все расчетные параметры заранее обречена на неудачу» [114]. В такой ситуации, как считал С. М. Флейшман, «... определение скорости равномерного и установившегося движения имеет большое значение не только как осреднение скорости движения селя, но и само по себе для решения большого количества чисто инженерных задач» [82].

Скорость селевых потоков может изменяться от 2 до 400 км/ч [10, 11]. Течение может быть турбулентным, при этом поток окутывается облаком, состоящим из мельчайших частиц грязи, осаждающихся на почве и растительности на расстоянии нескольких десятков метров от потока (рисунок 6.1) [10], и квазиламинарным, при этом поток оставляет на берегах четкие границы (рисунок 6.2) [11].

Рисунок 6.1. Пятнадцатиметровая волна селя, окутанная грязевым облаком, входит в селехранилище в урочище Медеу 15 июля 1973 г.

Рисунок 6.2. Следы прохождения селевого потока в бассейне р. Улькен Алматы 19 августа 1975 г.

Особенностью ламинарного течения является параллельность движения слоев жидкости в потоке, причем скорость течения по глубине потока неодинакова: от нулевого значения на дне потока до максимального у поверхности.

Известно, что для случая равномерного движения уравнение сил, действующих при ламинарном движении жидкостей, записывается в виде

$$\eta \frac{dV}{dy} = (H - y)\rho_o g \sin\alpha. \tag{6.1}$$

Решая это уравнение, нетрудно показать, что

$$V = \frac{\rho_o g \sin\alpha}{2\eta}(2H - y)y. \tag{6.2}$$

Максимальная скорость потока

$$V_{\max} = \frac{\rho_o g H^2 \sin\alpha}{2\eta}, \tag{6.3}$$

средняя скорость

$$V_{ср} = \frac{2}{3} V_{\max}. \tag{6.4}$$

Ламинарный режим в потоках при малой шероховатости русел устойчиво существует при числах Рейнольдса Re<300–600. Наличие в селевых суспензиях твердых частиц, размеры которых существенно превышают размер молекул воды (но значительно меньше глубины потока), исключают возможность параллельного сдвига слоев в потоке, т.е. возможность ламинарного течения. Однако даже при значительных концентрациях твердого компонента в селевой массе перенос количества движения из слоя в слой за счет вращения частиц не приводит к существенным погрешностям при определении скорости течения по формулам, полученным для условий ламинарного течения жидкостей. Течение селевой массы, подчиняющееся закономерностям ламинарного течения ньютоновских жидкостей, будем называть подобным ламинарному (квазиламинарным). Квазиламинарный режим движения селей – крайне редкое явление, наблюдающееся лишь в случаях, когда твердый компонент селевой массы представлен лёссовидными породами, максимальные размеры частиц которых составляют доли миллиметра.

Однако на больших уклонах движение селевого потока сопровождается интенсивной деформацией. В результате этого из селевого потока могут вылетать на десятки метров камни, вес которых составляет десятки килограммов (рисунок 6.3).

Наличие вязкопластических свойств у медленно движущейся селевой массы приводит к качественным изменениям структуры потока – у поверхности образуется слой, обладающий свойством твердых тел. До тех пор, пока упомянутый слой разрушается проникающими в него вихрями, течение селевой массы практически не отличается от квазиламинарного. С ростом предельного напряжения сдвига (или уменьшением уклона) толщина слоя увеличивается, и при определенных условиях поверхностный слой потока практически перестает разрушаться. В этом случае селевой поток состоит из двух зон: верхней зоны (ядра), в которой градиент скорости по вертикали отсутствует и нижней зоны – области, где $dV/dy \neq 0$.

Рисунок 6.3. Движение селевого потока,
сопровождающегося интенсивной деформацией

Средняя скорость равномерного движения селя в описываемой ситуации находится по формуле [162]

$$V_{ср} = \frac{\rho_{см} g H^2 k_1 \sin\alpha}{3\eta_{см}}, \tag{6.5}$$

где $k_1=(h/H)^2$ (1,5-0,5h/H),

а толщина ядра

$$h = \frac{\tau_{см}}{\rho_{см} g \sin\alpha}. \tag{6.6}$$

По мнению В. И. Тевзадзе, пределы применимости формулы (6.5) определяются обобщенным числом Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_{см} V_{ср} H k_2}{\eta_{см}} \le 500 \div 1000, \tag{6.7}$$

где $k_2 = \frac{h}{H}\frac{1}{1{,}5 - 0{,}5h/H}$.

Если селевая масса состоит из воды и коллоидных частиц, то на контакте «селевая масса – русло» возможно формирование слоя с повышенным содержанием воды (явление синерезиса). Модель трехслойного движения потока описана В. И. Тевзадзе и Э. Г. Кухалашвили [163].

В реальных условиях, когда в селевой массе присутствуют, как минимум, частицы песка, а русло имеет шероховатость, соизмеримую по размерам с

песчинками, явлением синерезиса при расчете характеристик селей можно пренебречь.

Наиболее сложным для математического описания является турбулентный режим движения селевого потока. Турбулентный режим характерен для фазы формирования селевой массы в процессе взаимодействия водного потока с рыхлообломочными породами, а также движения селевой массы, вязкопластические свойства которой не являются определяющими в сопротивлении движению потока. Твердый компонент селевой массы при турбулентном режиме перемещается преимущественно во взвешенном состоянии за счет энергии струй, имеющих составляющие, противонаправленные действию силы тяжести.

Поскольку в турбулентных потоках сопротивление движению носит инерционный характер, влияние плотности селевой массы на скорость движения потока незначительно.

Н. В. Рухадзе [164], применив к анализу «критического массива» (собранного И. И. Херхеулидзе [165]) метод множественной корреляции и задаваясь лишь общим видом искомых связей, получила следующую формулу для расчета скорости селевого потока:

$$V = 4{,}9H^{0{,}47}i^{0{,}22}w_m^{0{,}047}\ , \tag{6.8}$$

здесь $i=sin\alpha$; w_m – коэффициент текучести, равный $w_m = \dfrac{S_{nm}}{S_{nm} - S_o}$, где S_{nm}, S_o – концентрация наносов на пределе текучести и фактическая.

Формула (6.8) по своей структуре близка к формуле скорости ЗакНИГМИ

$$V = 4{,}83H_{cp}^{0{,}5}i^{0{,}25}, \tag{6.9}$$

а также формуле И. И. Херхеулидзе, включенной в Инструкцию по определению расчетных характеристик дождевых селей ВСН 03-76 [166]

$$V = 1{,}14\sqrt{H}\sqrt[3]{iw_m}. \tag{6.10}$$

Имеющиеся к настоящему времени данные о реологических свойствах селевой массы позволяют сделать некоторые выводы о структуре формул для расчета скорости селевого потока, а также некоторых численных значениях, входящих в эти формулы. Необходимость в этом, по нашему мнению, вызвана непрекращающимися попытками разработки формул для расчета скорости селевого потока, авторы которых стараются ограничиться минимумом исходной информации о свойствах селевой массы, как правило, плотностью селевой массы и ее твердого компонента, а также некоторыми характеристиками, например степенью раздвижки наиболее плотной упаковки твердых частиц.

В общем случае обсуждаемые зависимости имеют вид

$$V = f\left(H, i, \rho_T, \rho_{cm}, w_m\right). \tag{6.11}$$

Поскольку область применения формул для определения скорости селевого потока, как правило, не оговаривается, степень их физической

обоснованности можно оценить из следующих соображений. Изменение режима течения селевого потока при увеличении плотности селевой массы обусловливается изменением природы сопротивления движению селевого потока. Силы инерции, определяющие характеристики турбулентного движения, замещаются силами вязкопластичной природы в условиях квазиламинарных течений. Следовательно, с изменением плотности селевой массы структура формул должна изменяться таким образом, чтобы результаты вычислений соответствовали таковым, осуществляемым по формулам для турбулентного (например, формуле Шези) или ламинарного течения [уравнение (6.5)].

Наиболее существенными признаками трансформации структуры обсуждаемых формул при переходе от турбулентного режима к ламинарному являются:

изменение показателя степени глубины потока от 0,67 до 2;

увеличение показателя степени уклона русла от 0,5 до 1;

переход от независимости до прямой зависимости скорости от плотности селевой массы.

Обращает на себя внимание и существенное различие показателей степени уклона русла в формулах для определения скорости потока (турбулентный режим), принадлежащих различным авторам: от 0,17 до 0,5 [53, 165, 167–171].

Анализ исходных материалов, использованных в работе В. В. Голубцова [167], позволяет сделать вывод о том, что причиной столь незначительного влияния уклона русла (например, $i^{0,17}$) на скорость потока является использование формулы (6.10) для «автоматического» учета изменения относительной шероховатости русла от уклона участков, на которых измерялась скорость.

В ходе селевого процесса относительная шероховатость русла может существенно изменяться, поэтому использование формулы В. В. Голубцова при расчете характеристик селя требует специального обоснования.

Т. Такахаши [129], используя теорию Р. Багнольда о дисперсионном давлении высококонцентрированного потока, получил распределение скорости по глубине потока, не обладающего вязкостью и пластичностью, определяемое формулой

$$\frac{V_s - V}{V_s} = \left(1 - \frac{y}{H}\right)^{3/2}, \qquad (6.12)$$

где V_s – скорость потока на поверхности, м/с; V – скорость потока на глубине y, м/с; H – глубина потока, м.

Средняя скорость в поперечном сечении потока равна

$$V = \frac{2}{5d}\left\{\frac{g}{a\sin\varphi_{дин}}\left[C_d + (1 - C_d)\frac{\rho_o}{\rho_T}\right]\right\}^{1/2}\left[\left(\frac{C_*}{C_в}\right)^{1/2} - 1\right]H^{3/2}(\sin\alpha)^{1/2}. \qquad (6.13)$$

Им же получена эмпирическая зависимость между скоростью и расходом воды, поступающей на вход селевого очага, которая позволяет прогно-

зировать глубину потока в селевом очаге в установившемся режиме движения.

Для вязкопластического потока распределение скорости по глубине имеет вид

$$\frac{V_s - V}{V_s} = \left(1 - \frac{H}{h}\frac{y}{H}\right)^2, \qquad (6.14)$$

где H – глубина потока, м; h – высота от дна потока до точки, где действующее сдвиговое напряжение равно пределу текучести, м.

В такой ситуации часть потока в слое (H-h) ведет себя как твердое тело, движущееся по ламинарному потоку. Этот слой Т. Такахаши определяет как

$$H - h = \frac{\tau_y}{\left[\rho_T C_в - (1 - C_в)\rho_0\right] g \sin\alpha}. \qquad (6.15)$$

Когда h=H, то жидкость ньютоновская. Средняя скорость в поперечном сечении потока в этом случае определяется уравнением

$$V = \frac{(h/H)^2 (1 - h/H)}{2\eta_o}\left[\rho_T C_d + (1 - C_d)\rho_o\right] g H^2 \sin\alpha. \qquad (6.16)$$

Использование приведенных уравнений для расчета скорости селя подразумевает наличие информации о режиме движения потока. Как правило, в качестве такой информации выступает критическое значение числа Рейнольдса. Однако для вычисления чисел Рейнольдса необходимо знание той самой скорости, вычисление которой и составляет задачу.

Попытка разработки уравнения, внутренняя структура которого «автоматически» учитывает режим движения потока, предпринята в работе Ю. Б. Виноградова [114]. Соотношение между напряжением и скоростью деформации селевой массы Ю. Б. Виноградов записывает в виде

$$\tau - \tau_{см} = \eta_{см}\frac{dV}{dy} + \rho_{см} l^2 \left(\frac{dV}{dy}\right)^2, \ \tau \geq \tau_{см}, \qquad (6.17)$$

где τ – полное касательное напряжение трения, Н/м^2; $\tau_{см}$ – предел текучести, Н/м^2; V – осредненная по времени скорость движения потока, м/с; $\rho_{см}$ – плотность селевой массы, кг/м^3; l – «длина пути перемешивания», величина, зависящая от y и характеризующая размер турбулентных возмущений в данной точке, м.

Допуская, что

$$l^2 = \beta H^r, \qquad (6.18)$$

где β и r – эмпирические параметры, оцениваемые при решении обратной задачи, и определяя их через известные формулы для расчета средней скорости водного потока: $r = \frac{5}{3}$; по формуле Шези-Маннинга $\beta = 1{,}57n^2$; по формуле В. В. Голубцова $\beta = 1{,}57m^2(\sin\alpha)^{\frac{3}{2}}$, n и m – коэффициенты

шероховатости по Р. Маннингу и В. В. Голубцову соответственно, а также определяя значения величин τ и $\tau_{см}$:

$$\tau = g\rho_{см}(H-y)\sin\alpha,$$

$$\tau_{см} = g\rho_{см}(H-y)\cos\alpha tg\varphi,$$

где φ – угол внутреннего трения селевой массы, отвечающий пределу текучести, град.

Ю. Б. Виноградов записывает уравнение (6.17) в виде

$$g\rho_{см}(H-y)(\sin\alpha-\cos\alpha tg\varphi)=\rho_{см}\beta H^2\left(\frac{dV}{dy}\right)^2+\eta_{см}\frac{dV}{dy}. \qquad (6.19)$$

Решение этого уравнения относительно скорости потока позволяет получить значения максимальной и средней скорости потока [114]:

$$V_{\max}=\frac{2}{3}\frac{H^r}{N}\left[\left(\frac{M^2}{H^{2r}}+\frac{N}{H^{r-1}}\right)^{3/2}-\frac{M^3}{H^{3r}}\right]-\frac{M}{H^{r-1}}, \qquad (6.20)$$

$$V_{ср}=\frac{2}{3}\frac{H^r}{N}\left(\frac{M^2}{H^{2r}}+\frac{N}{H^{r-1}}\right)^{3/2}-\frac{4}{15}\frac{H^{2r-1}}{N^2}\left[\left(\frac{M^2}{H^{2r}}+\frac{N}{H^{r-1}}\right)^{5/2}-\frac{M^5}{H^{5r}}\right]-\frac{M}{2H^{r-1}},$$

где $M=\frac{\eta_{см}}{2\rho_{см}\beta}=\frac{\nu}{2\beta}$; $N=\frac{g(\sin\alpha-\cos\alpha tg\varphi)}{\beta}$; ν – кинематическая вязкость, м^2/с.

Качественный анализ описанной модели движения селей дает представление о реологической модели селевой массы, которой оперирует ее автор. Селевая масса представлена твердыми частицами, промежутки между которыми лишь частично заполнены жидким компонентом, вследствие чего действие архимедовой силы на частицы не проявляется: в уравнениях (6.19) и (6.20) сдвигающее и удерживающее напряжения (τ и $\tau_{см}$) находятся в прямой зависимости от плотности селевой массы. Селевая масса не обладает свойством пластичности. Особенностью селевой массы является наличие постоянного контакта между частицами всех крупностей и руслом. О кулоновской природе напряжения $\tau_{см}$ свидетельствует его зависимость от координаты y в уравнении (6.20).

Для реальных уклонов русла движение селевой массы возможно лишь в ситуациях, когда выполняется условие $\sin\alpha>tg\varphi$. По оценке Ю. Б. Виноградова, динамический угол внутреннего трения аллювия под водой может изменяться от 18 до 35°, а в селевых очагах взаимодействия (для типичных пород ПСМ) динамический угол внутренного трения варьирует от 30 до 38°. Область применения уравнения (6.18) – уклоны, характерные для селевых очагов (18–35°).

Анализ предельных условий существования селевой массы показывает, что доля кулоновского трения в сумме всех мешающих движению селя воздействий для подавляющего большинства практически важных ситуаций весьма невелика. Поэтому при разработке моделей скорости движения

селевого потока допустимо считать, что на величину сопротивления в основном оказывают влияние турбулентная и квазиламинарная вязкости, предельное напряжение сдвига. Степень их влияния зависит от состава селевой массы, режима движения селевого потока.

Ранее упоминалось, что в некоторых случаях представление селевой массы гомогенной средой плодотворно. Областью исследования, в которой представление селевой массы гомогенными жидкостями резко упрощает математическое описание процессов, является кинематика селей. Плотность, вязкость и другие характеристики таких сред приравниваются таковым селевой массы в репрезентативном объеме.

Реологической моделью гомогенного течения, когда можно пренебречь влиянием предельного напряжения сдвига, как известно, является уравнение

$$\tau = \eta_{см} \frac{dV}{dy} + \rho_{см} l^2 \left(\frac{dV}{dy} \right)^2, \tag{6.21}$$

причем

$$\tau = \rho_{см} g r \sin \alpha, \tag{6.22}$$

где y – нормаль к оси потока, м; l – масштаб турбулентности, м; r – гидравлический радиус потока, м.

Тогда

$$\rho_{см} g \sin \alpha = \eta_{см} \frac{dV}{dy} + \rho_{см} l^2 \left(\frac{dV}{dy} \right)^2, \tag{6.23}$$

откуда

$$\frac{dV}{dy} = -\frac{\eta_{см}}{2\rho_{см} l^2} + \sqrt{\frac{\eta_{см}^2}{4\rho_{см}^2 l^4} + \frac{gr \sin \alpha}{l^2}}. \tag{6.24}$$

Соотношение между приращением глубины потока и приращением гидравлического радиуса может быть записано [87] как

$$dy = c_ф dr, \tag{6.25}$$

где $c_ф$ – коэффициент формы сечения потока.

Разделяя переменные в уравнении (6.24) и учитывая (6.25), получаем

$$dV = -\frac{\eta_{см} c_ф}{2\rho_{см} l^2} dr + c_ф \sqrt{\frac{\eta_{см}^2}{4\rho_{см}^2 l^4} + \frac{grdr \sin \alpha}{l^2}}. \tag{6.26}$$

Решением этого дифференциального уравнения является

$$V = -\frac{\eta_{см} c_ф r}{2\rho_{см} l^2} + \frac{2l^2 c_ф}{3g \sin \alpha} \left[\left(\frac{\eta_{см}^2}{4\rho_{см}^2 l^4} + \frac{gr \sin \alpha}{l^2} \right)^{3/2} - \left(\frac{\eta_{см}^2}{4\rho_{см}^2 l^4} \right)^{3/2} \right]. \tag{6.27}$$

Для турбулентного режима течения уравнение (6.26) записывается следующим образом:

$$dV = \frac{c_ф}{l}\sqrt{grdr\sin\alpha}\,, \tag{6.28}$$

а его решение

$$V = \frac{2}{3}\frac{c_ф\sqrt{g}}{l}r\sqrt{r\sin\alpha} \approx \frac{2{,}1c_ф r}{l}\sqrt{r\sin\alpha}\,. \tag{6.29}$$

В случае, если селевая масса обладает вязкопластическими свойствами и нельзя пренебречь предельным напряжением сдвига $\tau_{см}$, дифференциальное уравнение (6.26) принимает вид

$$dV = -\frac{\eta_{см}c_ф dr}{2\rho_{см}l^2} + c_ф\sqrt{\frac{\eta_{см}^2}{4\rho_{см}^2 l^4} + \frac{gr\sin\alpha}{l^2} - \frac{\tau_{см}dr}{\rho_{см}l^2}}\,, \tag{6.30}$$

а его решением будет

$$V = -\frac{\eta_{см}c_ф}{2\rho_{см}l^2}r + \frac{2l^2c_ф}{3g\sin\alpha}\times$$
$$\times\left[\left(\frac{\eta_{см}^2}{4\rho_{см}^2 l^4} + \frac{g\sin\alpha}{l^2}r - \frac{\tau_{см}}{\rho_{см}l^2}\right)^{3/2} - \left(\frac{\eta_{см}^2}{4\rho_{см}^2 l^4} - \frac{\tau_{см}}{\rho_{см}l^2}\right)^{3/2}\right]. \tag{6.31}$$

Максимальная скорость V_{max} имеет место на поверхности потока при $r=R$.

Результаты исследования кинематики движения селевого потока, движущегося в турбулентном режиме, показали, что его средняя скорость

$$V_{ср} = 0{,}8V_{\max}\,. \tag{6.32}$$

Для ламинарного режима течения средняя скорость потока, как известно, равна

$$V_{ср} = \frac{c_ф\rho_{см}g\sin\alpha}{3\eta_{см}}R^2\,. \tag{6.33}$$

Понятие «масштаб турбулентности» было введено для жидкости. Г. Шлихтинг [172] определил его как пространственное протяжение элементов турбулентности. Масштаб турбулентности менялся в зависимости от положения точки в потоке и ограничивается размерами потока. В первом приближении предполагается, что размеры крупных вихрей в наносоводном потоке пропорциональны гидравлическому радиусу, т.е.

$$l = \kappa R\,, \tag{6.34}$$

где коэффициентом пропорциональности служит параметр Кармана κ, зависящий от концентрации частиц грунта в потоке [173]. Для случая равномерного распределения частиц по сечению потока параметр Кармана выражается зависимостью

$$\kappa \approx 0{,}4\frac{1 + C(\frac{\rho_T}{\rho_o} - 1)}{1 + 2{,}5C}\,. \tag{6.35}$$

Используя понятие масштаба турбулентности при определении скорости селевого потока, нужно помнить, что природа турбулентности селевых потоков отлична от таковой водных потоков. На масштаб турбулентности оказывают влияние и крупные частицы в составе селевой массы, а также большая шероховатость русла Δ, соизмеримая с глубиной потока.

По результатам полевых и лабораторных исследований нами получена эмпирическая зависимость масштаба турбулентности селевых потоков от указанных величин:

$$l = \frac{\sqrt{(Cd_{75})^2 + (\kappa R)^2}}{3{,}2\left[\left(\frac{R}{\Delta}\right)^{1/6} - \left(\frac{\Delta}{R}\right)^{1/6} + 0{,}3\right]}, \qquad (6.36)$$

где параметр κ вырождается в постоянную величину κ=0,32.

Размер шероховатости русла Δ определяется высотой выступов и принимается равным

$$\Delta = d_{75} + 0{,}1H\ . \qquad (6.37)$$

Для проверки предлагаемой модели скорости движения селей и сравнения ее с существующими моделями была рассчитана средняя скорость движения Шамалганских селей 1975 и 1978 гг. [132, 133] и Кумбельского селя 1975 г. (бассейн р. Улькен Алматы) [11]. На рисунке 6.4 сопоставлены результаты расчета скорости селевого потока по формулам И. И. Херхеулидзе [165], М. Ф. Срибного [174], В. В. Голубцова [167], В. В. Яблонского и КазНИГМИ с фактическими данными ($V_{факт}$).

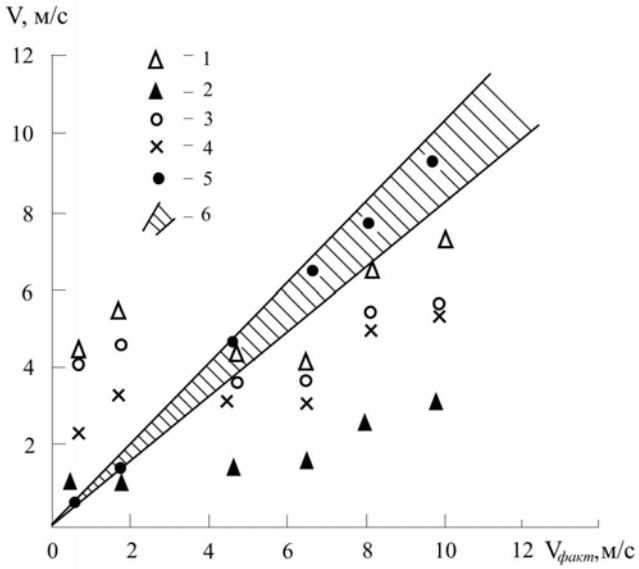


Рисунок 6.4. Сравнение результатов расчета скорости селевых потоков по различным формулам с фактическими данными:
И. И. Херхеулидзе (*1*); М. Ф. Срибного (*2*); В. В. Голубцова (*3*);
В. В. Яблонского (*4*); КазНИГМИ (*5*); область ±10 %-й погрешности модели (*6*)

Шамалганские сели (1975 г.: 1-й попуск, первый вал – $V_{факт}$=9,8 м/с; второй вал – $V_{факт}$=6,4 м/с; 2-й попуск, первый вал – $V_{факт}$=8,0 м/с; 1978 г.: первый вал – $V_{факт}$=4,3 м/с) обладали турбулентным режимом движения, плотность их селевой массы составляла 2300 кг/м^3 в первых и 2200 кг/м^3 в последующих валах. Кумбельский сель 1975 г. имел чрезвычайно высокую плотность 2520 кг/м^3 [11] и квазиламинарный режим течения (скорость определялась в 2 створах: $V_{факт}$=0,64 м/с, $V_{факт}$=1,73 м/с).

Анализ рассчитанных и полученных экспериментально значений скорости селевых потоков показывает, что скорость, рассчитанная по формуле И. И. Херхеулидзе, являясь неплохим приближением наблюденных скоростей Шамалганских селей, завышает примерно в 7 раз скорость Кумбельского селя. И наоборот, если значения скорости, рассчитанные по формуле М. Ф. Срибного, дают удовлетворительное (≈40 %) значение скорости Кумбельского селя, то его модель занижает примерно в 6 раз скорость движения турбулентных селей. Следовательно, указанные формулы, равно как и другие, имеют ограниченное применение.

Скорости, рассчитанные по модели КазНИГМИ, в большинстве случаев отклоняются на ±10 % от фактических данных.

6.2. Энергетические характеристики селевого потока

Основным источником энергии, приводящей к перемещению огромных водных масс, взвешенных и влекомых наносов, селевой массы на большие расстояния, являются потенциальная и кинетическая энергии составляющих частей потока. Поскольку роль кинетической энергии в селевых процессах порой необоснованно завышается, определим (используя известные выражения для потенциальной $W_n = mgH$ и кинетической $W_k = \frac{mV^2}{2}$ энергий) длину участков русел для различных уклонов, при перемещении на которых выделяющаяся потенциальная энергия равна кинетической энергии, соответствующей той или иной скорости потоков. Результаты вычислений приведены на рисунке 6.5.

Нетрудно видеть, что для уклонов речных долин 1–5° и скоростей селей 3–5 м/с (10,8–18 км/ч) изменение потенциальной энергии на величину, равную кинетической энергии, происходит при перемещении селей в долинах на участках длиной в несколько десятков метров. Принимая во внимание, что протяженность долин составляет, как правило, десятки километров, можно сделать вывод о превалирующей роли потенциальной энергии в создании условий для перемещения селевой массы.

Кинетическую энергию селевого потока необходимо учитывать, когда решаются вопросы взаимодействия селевого потока с естественными и искусственными препятствиями (изгибы русел и долин, противоселевые сооружения и т.д.).

В рамках классических представлений о природе турбулентности А. С. Мониным и А. М. Ягломом [175] установлено, что отбор энергии от

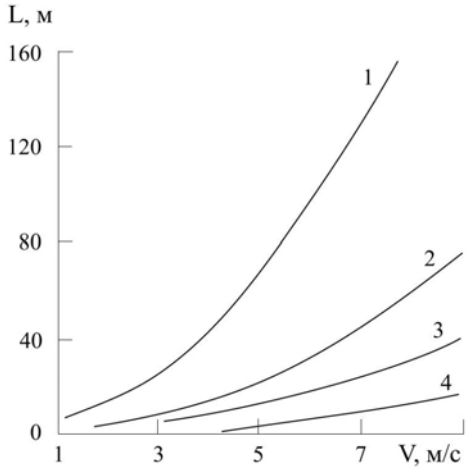


Рисунок 6.5. Зависимость длины участков русел, при перемещении селевой массы на которых выделяющаяся энергия равна кинетической, от скорости движения селей и уклона русла: *1* – 1°; *2* – 3°; *3* – 5°; *4* – 10°

осредненного плоского движения производится только продольными пульсациями скорости. В свою очередь, продольные пульсации являются источником энергии генерации поперечных пульсаций, что приводит к перемешиванию селевой массы, обусловливающему возможность переноса частиц во взвешенном состоянии.

Продольные пульсации скорости обусловлены русловой турбулентностью. В. М. Лятхер [176] обнаружил, что в прямолинейных руслах с равномерным (квазиравномерным) движением водных потоков макротурбулентность проявляется в образовании трехмерных вихрей. Наиболее крупные вихри (гладкое дно) имеют вертикальные размеры, близкие к глубине потока (*H)*, а продольные – 6,7*H* [176]. С увеличением относительной шероховатости русел продольные размеры крупных вихрей уменьшаются. Максимум продольного компонента наблюдается вблизи дна, вертикального компонента в зоне (0,1–0,4)*H* от дна. Во времени и пространстве генерация описываемых вихрей носит случайный характер.

Распад крупных вихрей сопровождается возникновением более мелких по масштабу вихрей. Таким образом, все пространство от дна потока до его поверхности заполняется вихревыми образованиями различной формы и размеров. Взаимодействие вихрей между собой в процессе перемещения их в направлении осредненного движения порождает широкий спектр пульсаций скоростей в потоке. По сведениям, приведенным в работе А. Б. Клавена [177], среднее значение продольного пульсационного компонента по глубине

$$u'' = 0{,}5V^*, \tag{6.38}$$

а среднее значение вертикального пульсационного компонента

$$v'' = 0{,}41V^*, \tag{6.39}$$

где V^* – динамическая скорость, м/с.

Эти соотношения получены при изучении характеристик водных потоков, перемещающихся в руслах с гидравлически гладким и зернисто-шероховатым дном.

Качественно иная ситуация наблюдается в руслах, размеры шероховатости которых соизмеримы с глубиной потоков (горные реки, селевые очаги). Величины поперечных составляющих скорости движения потоков, амплитуды их пульсационных составляющих в решающей мере определяются характером взаимодействия потока с вмещающим его руслом, что находит наглядное подтверждение при наблюдении за характером поверхности водного потока, движущегося на большом уклоне.

Высота возмущений на свободной поверхности потока в первом приближении связана с вертикальными составляющими скорости струй соотношением

$$V^2 = 2gh\,. \qquad (6.40)$$

Результаты вычислений хорошо согласуются с данными наблюдений за взаимодействием водного потока с элементами шероховатости гидросооружений Большого Алматинского канала (БАК).

В процессе формирования и движения селевого потока создаются условия, при которых вертикальные составляющие скорости локальных объемов селевого потока могут превышать значение средней продольной скорости потока. Связано это с неравномерностью движения крупных частиц твердого компонента селевого потока (валуны, глыбы). Резкое торможение отдельных частиц или их групп в результате взаимодействия частиц с элементами русла приводит к тому, что селевая масса, находящаяся между затормозившимися частицами и частицами, продолжающими движение по инерции, испытывает сильное сжатие. Увеличение давления обусловливает выброс из порового пространства, образуемого крупными частицами, не только жидкого компонента, но и относительно крупных частиц, размеры которых могут составлять десятки сантиметров.

Наличие в потоке вихрей, продольных и поперечных пульсаций скорости и т.д. создают предпосылки для перемешивания селевой массы, при этом часть энергии потока может быть затрачена на перенос во взвешенном состоянии частиц, плотность которых превышает плотность воды. Если при движении селевого потока в русле с гидравлически гладким дном характеристики перемешивания определяются таковыми крупных вихрей и носят случайный характер, то перемешивание в русле с шероховатостью, соизмеримой с глубиной селевого потока, носит квазидетерминированный характер. Случайный характер перемешиванию придает изменение во времени и пространстве положения (размеров) частиц, формирующих шероховатость русла (частицы, потерявшие связь с руслом, вовлекаются в движение, а размыв русла приводит к обнажению крупных частиц, формирующих на какое-то время его шероховатость).

Как отмечалось, основным источником энергии потока является его потенциальная энергия. При рассмотрении вопросов, связанных с энергобалансом взвесенесущих потоков, считается, что эта энергия затрачивается

на квазитурбулентное перемешивание, поддержание твердого компонента селевой массы во взвешенном состоянии, перенос донных наносов, нагревание селевой массы и т.д. До последнего времени в уравнениях энергобаланса водных потоков отбрасывается член, учитывающий работу пульсаций давления в потоках. Объяснение этому находили в слабых корреляционных связях между пульсациями скоростей и давлений. Возможно, это оправдано для равнинных рек и потоков, хотя сопоставление теоретических расчетов с данными экспериментальных наблюдений свидетельствует о значимых расхождениях между генерируемой и диссипируемой энергиями [173].

Наблюдения за физическими явлениями, сопровождающими движение потоков на относительно больших уклонах (единицы, десятки градусов), свидетельствуют о том, что часть энергии потоков расходуется на возбуждение акустических и сейсмических волн. Мощность акустических волн, возбуждаемых с одного квадратного метра поверхности потоков, может превышать ватты, а мощность сейсмических волн – киловатты.

Понимание физики селевых явлений невозможно без правильного представления о характере изменения мощности, развиваемой единичным объемом движущейся селевой массы, в зависимости от концентрации твердого компонента в последней. С этой целью проделаем несколько мысленных экспериментов с двухкомпонентной селевой массой, поддержание твердого компонента которой во взвешенном состоянии не требует затрат энергии.

Рассмотрим движение селевой массы (глубина потока H_1, H_2, H_3) в русле, имеющем постоянный уклон. Частицы селевой массы имеют **плотность, равную плотности воды**, селевая масса не обладает вязкопластическими свойствами. В описываемой ситуации мощность, развиваемая единичным объемом потока, зависит только от скорости движения потока. Результаты расчета зависимости мощности такого потока от концентрации частиц в селевой массе приведены на рисунке 6.6.

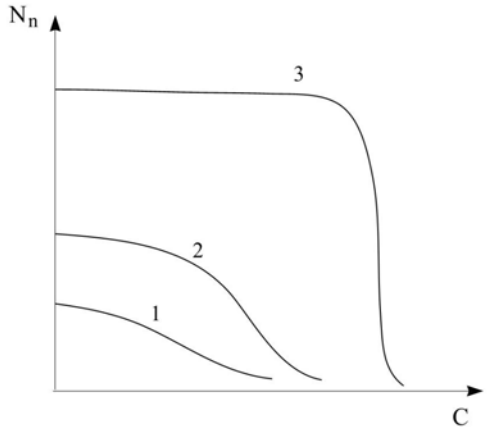


Рисунок 6.6. Зависимость мощности, развиваемой единичным объемом селевой массы потока, от концентрации твердого компонента.
1–3 – для глубин H_1, H_2, H_3; $H_1 < H_2 < H_3$; α=const

Кривая *1* отвечает условию движения потока в ламинарном режиме даже при *C=0*. Добавление в поток частиц увеличивает вязкость образующейся селевой массы и, следовательно, приводит к уменьшению скорости и мощности потока.

Кривая *2* соответствует ситуации, когда при малых концентрациях твердого компонента в потоке сохраняется турбулентный режим движения: начальный участок кривой параллелен оси абсцисс; дальнейшее увеличение концентрации твердого компонента приводит к соответствующему изменению вязкости селевой массы, обусловливающему переход режима течения от турбулентного к ламинарному.

Форма кривой *3* объясняется тем, что в широком диапазоне концентраций твердого компонента в селевой массе сопротивление движению определяется турбулентной вязкостью (скорость и мощность потока не зависят от значений *C*). Лишь при высоких концентрациях квазимолекулярная вязкость превалирует в полном балансе сопротивлений движению потока.

Пусть селевая масса представляет собой смесь, состоящую из жидкого и твердого компонентов одинаковой плотности и равную плотности селевой массы, которая образуется водой и твердыми частицами с плотностью 2650 кг/м^3 при различных концентрациях частиц. Посмотрим, как изменяется мощность, развиваемая единичным объемом селевой массы при ее движении (рисунок 6.7).

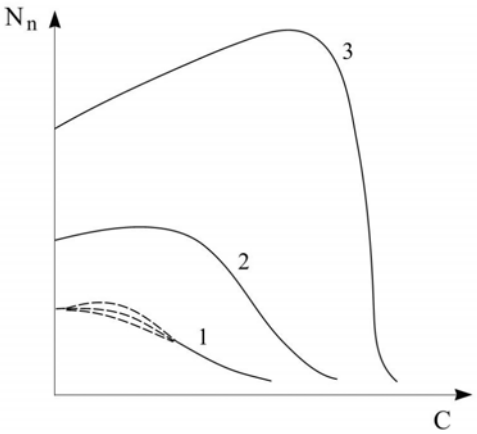


Рисунок 6.7. Зависимость мощности, развиваемой единичным объемом потока, от концентрации твердого компонента.
1 – H_1; 2 – H_2; 3 – H_3; $H_1 < H_2 < H_3$; α=const

Цель надуманных, на первый взгляд, допущений – исключить необходимость в совершении работы по поддержанию твердого компонента во взвешенном состоянии, ибо в противном случае селевая масса не может существовать в условиях квазиламинарного движения потока.

В отличие от кривой *1* рисунка 6.6 начальный участок кривой *1* рисунка 6.7, в зависимости от степени возрастания плотности селевой массы (вследствие увеличения концентрации твердого компонента), может иметь различный наклон. Если действие силы тяжести превалирует над сопро-

тивлением движению, имеющему вязкостную природу, функция $N_n=N_n(C)$ растет, в противном случае она уменьшается. Возможен и вариант, при котором упомянутая функция на каком-то участке изменения плотности селевой массы остается постоянной (отрезок кривой параллелен оси абсцисс).

Если же режим движения потока турбулентный, функция $N_n=N_n(C)$ возрастает до тех пор, пока вязкость не приведет к уменьшению скорости потока и, как следствие, снижению функции $N_n=N_n(C)$ – кривые *2* и *3* рисунка 6.7.

При рассмотрении вопросов, связанных с определением критических условий существования селевой массы, особый интерес представляют семейства функций, описывающие изменение $N_n=N_n(C)$ в зависимости от угла наклона русла при постоянных значениях глубины потока H. Одно из таких семейств показано на рисунке 6.8.

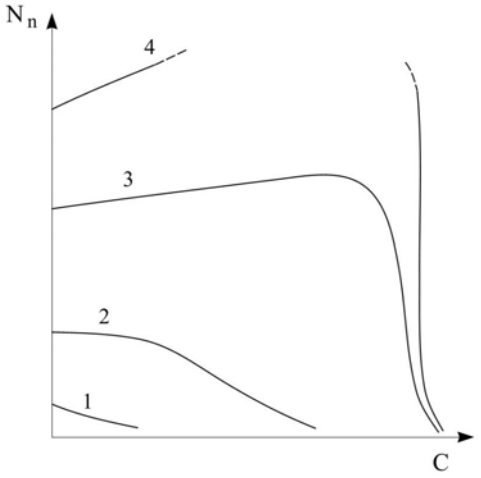


Рисунок 6.8. Семейство функций $N_n=N_n(C)$
для различных уклонов русел. *1–4* – уклоны $\alpha_1<\alpha_2<\alpha_3<\alpha_4$; H=const

В реальных условиях плотность твердого компонента селевой массы существенно отличается от такового воды, а необходимость в затратах энергии на взвешивание частиц осложняет описанную идеализированную картину. Однако качественная сторона энергетических процессов сохраняется.

Для оценки потенциальной транспортирующей способности потока необходимо научиться выделять из полной мощности потока N_n мощность $N_{n.взв}$, которая может использоваться потоком для поддержания твердого компонента во взвешенном состоянии, т.е., пользуясь терминологией М. А. Великанова, решить проблему определения КПД потоков как взвесенесущих механизмов.

Простейшее предположение, что в уравнении

$$N_{n.взв}=e_s N_n \qquad (6.41)$$

КПД потока $e_s=const$, физически неправомерно, поскольку при ламинарном режиме движения потока $N_n\neq 0$, в то время как $N_{n.взв}=0$ из-за отсутствия поперечного переноса масс (попросту говоря, перемешивания).

Результаты наблюдений за горными потоками свидетельствуют о том, что КПД потоков как взвесенесущих механизмов возрастает с увеличением относительной шероховатости, принимая наибольшие значения в ситуациях, когда выступы шероховатости русел становятся соизмеримыми с глубинами потоков. При этом перемешивание осуществляется не крупными вихрями, а происходит в результате изменения направлений движения струй, возникающих при взаимодействии потока с элементами шероховатости русел.

В турбулентных потоках сопротивление движению определяется турбулентной вязкостью. Указанное сопротивление носит инерционный характер. Это означает, что скорость движения элементарных объемов, составляющих поток, непрерывно изменяется: уменьшаясь в результате «столкновения» с элементами шероховатости русел или с объемами потока, имеющими относительно меньшую скорость, и увеличиваясь под действием силы тяжести и «ударов» объемов, обладающих относительно большей скоростью. Такие соударения приводят к дроблению объемов, участвующих в хаотичном движении, в конечном счете увеличивая скорость движения молекул воды, т.е. ее температуру.

Причиной относительно высокого КПД потоков (как взвесенесущих механизмов), перемещающихся в руслах, шероховатость которых соизмерима с глубиной потоков, является особенность их движения. В промежутках между выступами шероховатости, линейные размеры которых изменяются от долей до единиц метров, вся толща потока, практически не испытывая сопротивления, разгоняется под действием силы тяжести от скорости, близкой к нулевой, до максимальной, развиваемой к моменту встречи с очередным выступом шероховатости. Взаимодействие потока с крупными выступами шероховатости обусловливает значительное, близкое к перпендикулярному по отношению к направлению осредненного движения, изменение направления движения струй, сечение которых соизмеримо с таковым выступов шероховатости. Энергия восходящих струй может непосредственно расходоваться на взвешивание твердого компонента селевой массы; струи, отклоняемые выступами шероховатости в поперечном, горизонтальном направлении, препятствуют движению струй, не взаимодействующих непосредственно на данном участке с выступами шероховатости, тем самым увеличивая эффективное сечение выступов.

Иная картина характерна для движения потоков в условиях малой относительной шероховатости русел. Наличие пульсаций скорости в толще потоков обусловливается наложением вихрей на среднее поступательное движение, скорость которого значительно (в несколько раз) превышает амплитуды его пульсационных составляющих, причем спектр пульсаций сдвинут в область высоких частот относительно спектра пульсаций, типичного для течений в условиях большой шероховатости. Увеличивается и относительная доля объемов, участвующих в пульсационном движении в единицу времени.

Относительно малые размеры вихревых образований, затрудняющих эффективную «эстафетную» передачу частиц от вихря к вихрю из придон-

ной области потоков к их поверхности, незначительные отличия в скоростях восходящих и нисходящих струй, вследствие чего вероятность подъема частиц не намного превышает таковую их опускания в вихрях, – основные причины уменьшения КПД потоков, движущихся в руслах с малой относительной шероховатостью.

Как отмечалось, гранулометрический состав морен характеризуется широчайшим диапазоном размеров частиц. Следствием этого является широкий спектр их гидравлической крупности.

Несмотря на высокую практическую значимость, вопросы согласования характеристик потоков и «транспортируемых» частиц не вышли за рамки постановки задач вследствие сложности кинематики процессов перемешивания в потоках. Изучение закономерностей распределения энергии по спектрам пульсаций скорости движения «элементарных» объемов в зависимости от формы сечения потоков и характеристик пути их движения позволит более корректно оценивать возможность перемещения тех или иных фракций во взвешенном состоянии.

Глава 7

ОСНОВЫ ТЕОРИИ СУЩЕСТВОВАНИЯ СЕЛЕВОЙ МАССЫ

Селевой процесс – процесс взаимодействия селя с вмещающим его руслом. Элементарное взаимодействие единичного объема потока с частицей селеформирующих пород состоит в передаче последней некоторого количества движения. Исход элементарного взаимодействия зависит от соотношения движущих сил и сил сопротивления движению. Если энергия, отдаваемая в дальнейшем частицей потоку, превышает энергию, затраченную им на вовлечение частиц в движение, результирующая энергия потока увеличивается. В целом это, создавая условия для вовлечения в движение других частиц, может привести к дальнейшему росту концентрации твердых частиц в потоке. Далее, с повышением вязкости и предельного напряжения сдвига селевой массы процесс затормаживается и, наконец, прекращается. Если энергия, затраченная потоком на вовлечение частиц в движение, не пополняется, мы имеем дело с процессом транспорта частиц, характеризующимся динамическим равновесием (термин «транспорт», физически правомерный только в ситуациях, при которых перемещение частиц осуществляется за счет энергии жидкого компонента селевого потока, широко используется и при описании движения твердого компонента грязекаменных потоков большой плотности, когда доля потенциальной энергии частиц превалирует в общем энергетическом балансе: твердые частицы перемещаются за счет собственной энергии).

Результат элементарного взаимодействия единичного объема потока с руслом зависит от большого числа факторов: уклона, ширины и формы русла, характеристик его шероховатости, расхода потока, реологических свойств и плотности селевой массы и т.д. Каждый элементарный акт взаимодействия потока с селеформирующими грунтами и в целом с руслом приводит к изменению энергии потока и одновременно к изменению характеристик селевой массы, т.е. состояния селевой массы.

Таким образом, состояние селевой массы зависит от условий протекания селевого процесса. Вот почему селевой процесс (эволюцию динамической системы «русло – сель») целесообразно рассматривать через изменение состояния селевой массы.

При прочих равных условиях параметром, указывающим на тенденцию изменения состояния, является плотность селевой массы, а управляющим параметром – уклон русла. С учетом сказанного нетрудно прийти к выводу, что график зависимости между минимальным уклоном, на котором не происходит распад или остановка селевой массы, и ее плотностью (Z-функция) есть ничто иное, как кривая распределения равновесных состояний по различным значениям управляющего параметра при фиксированных

значениях минералогического и гранулометрического составов селеформирующих пород и глубины потока. Причем совокупность устойчивых состояний равновесия (Ξ-функция) определяет те предельные значения плотности, которых может достичь селевая масса при достаточно большой длине селевого очага ($l \to \infty$) при всевозможных значениях управляющего параметра.

Ключевая задача теории существования селевой массы – раскрытие физической сущности и математическое описание изменения состояния селевой массы в зависимости от условий протекания селевого процесса и предыстории селя.

7.1. Постановка задачи

Определение предельно возможной плотности селевой массы было и остается одной из острейших проблем селеведения. Не вызывает сомнений, что на величину предельной плотности влияют характеристики самого потока, морфометрия русла, минералогический и гранулометрический составы селеформирующих пород. Однако исследования по выявлению степени влияния тех или иных факторов на предельную плотность селевой массы далеки еще от завершения.

Большой вклад в развитие теории перемещения твердого компонента селевой массы в гравитационном поле Земли внесли М. А. Великанов, М. А. Мостков, И. В. Егиазаров, И. И. Херхеулидзе, С. М. Флейшман, М. С. Гагошидзе, Д. Л. Соколовский, Г. В. Иванов, Г. М. Беручашвили, О. Г. Натишвили, В. И. Тевзадзе, Ю. Б. Виноградов, В. Г. Саноян, А. В. Магомедова, Ц. Е. Мирцхулава, Р. Г. Асатрян, Р. Багнольд, Т. Такахаши и др.

Наиболее полно вопросы образования селевой массы при взаимодействии водного потока с рыхлообломочными породами исследованы М. А. Мостковым [119]. К рассмотрению схем формирования селевой массы М. А. Мостков подходил с энергетических позиций. Описывая движение селевых потоков второго рода (турбулентные сели), а под ними он понимал потоки, в которых «... наблюдается отставание скорости движения твердого материала ...», М. А. Мостков считал, что «... вовлечение твердого материала ...» происходит «... как посредством качения по дну, так и путем взвешивания в потоке ...». Исследуя энергетические превращения, сопровождающие движение двухкомпонентных потоков, он счел возможным ограничиться учетом затрат на:

перемещение твердого компонента путем скачкообразного движения и перекатывания;

поддержание наносов во взвешенном состоянии;

соударение камней, находящихся во взвешенном состоянии.

В результате проведенного анализа им было получено выражение, описывающее зависимость предельной объемной концентрации твердого компонента C в двухкомпонентном потоке от уклона русла:

$$C = \frac{1{,}21\sin\alpha}{1-2\sin\alpha}. \qquad (7.1)$$

Важнейшим следствием упомянутой модели селеформировавания являлась потенциальная возможность насыщения водного потока твердым компонентом (до предела текучести образующейся селевой массы) на уклонах, близких к 18°.

Несмотря на то, что М. А. Мостков допускал возможность перехода «... от турбулентного селя к структурному (или ламинарному) ...» [119], а для последних в цитируемой работе считалось возможным движение на относительно малых уклонах ($sin\alpha$ изменяется от 0,04 до 0,06), это положение не нашло отражения в полученных им уравнениях. Отметим, в частности, что функция, описываемая уравнением (7.1), непрерывная и однозначная.

Гравитационная теория движения взвешенных наносов М. А. Великанова распространялась ее автором лишь на потоки с относительно низкой концентрацией твердого компонента: «... Согласно этой теории 50 % концентрация определяется как возможный теоретический предел, при котором турбулентный поток в состоянии переносить во взвешенном состоянии твердые частицы путем одного лишь поперечного перемешивания жидких масс» [111]. Указывая, что в общем случае селевая масса «... состоит из воды с растворенными в ней коллоидными глинистыми частицами, песка, гравия и крупных камней ...», М. А. Великанов считал, что «... активной частью селевой массы надо считать первую ее составляющую – глинистый раствор. Концентрация глины в воде, а также относительный объем жидкой части селевой массы определяют в основном динамические свойства селевого потока. Замечательно, что качественное изменение потока с изменением состава селевой массы происходит не непрерывно, а как бы скачком. Этот скачок происходит, когда концентрация близка к 50 % ...».

Качественное различие селей малой и большой плотности привлекало внимание многих исследователей. Так, Г. И. Тер-Степанян, анализируя данные о плотности селевой массы, обратил внимание на относительную редкость прохождения селей с плотностью, близкой к 1700 кг/м^3 [178]. Размышления о возможной природе этого явления позволили ему сформулировать гипотезу, согласно которой «... граничное значение объемного веса (1700 кг/м^3) является некоторым порогом, к которому селевые массы приближаются с трудом, а пройдя его, приобретают новую способность обогащаться твердым компонентом, и, следовательно, от этого порога легко отдаляются». К сожалению, встав на точку зрения авторов, утверждающих, что при приближении плотности селевой массы к 1600–1700 кг/м^3 «... вследствие исчезновения эффекта турбулентности ...» потоки теряют способность к дальнейшему обогащению твердым компонентом, Г. И. Тер-Степанян пришел к ошибочному выводу о наличии в процессе селеформирования «гидродинамической фазы развития» [178].

Эксперименты, поставленные в КазНИГМИ с целью проверки правильности положений, выдвинутых Г. И. Тер-Степаняном, показали, что при выполнении условий $\gamma_r > \gamma_w$ и $(\gamma_m - \gamma_w) > (\gamma_r - \gamma_m)$ крупные включения, если

тому не препятствуют силы, обусловленные пластичностью грязевой составляющей, не всплывают, а опускаются на дно (γ_r – объемный вес твердого компонента; γ_w – объемный вес воды; γ_m – объемный вес грязевой составляющей селевой массы).

До настоящего времени проектные организации в своей работе руководствуются «Инструкцией по определению расчетных характеристик дождевых селей», разработанной ЗакНИГМИ. Согласно этой «Инструкции …» концентрация твердого компонента для пиковой фазы селя определяется по формуле

$$S_{op} = \frac{S_{nm}\lambda_{sp}}{1 + \dfrac{0{,}0555}{\mu^{x_1}\left(\dfrac{I}{1000}\right)^{x_2}}}, \qquad (7.2)$$

где S_{nm} – предельная объемная концентрация твердого компонента, при которой селевая масса теряет свойства текучести; λ_{sp} – переходный коэффициент от обеспеченности P=1 % к заданной обеспеченности (равный единице при P=1 %); I – средний уклон главного тальвега, %; μ – коэффициент селеопасности района; $\mu \geq 0{,}063 I^{0{,}40}$, $x_1 = \dfrac{0{,}25}{(\mu + 0{,}065)^{0{,}5}}$,

$x_2 = \dfrac{2{,}0}{(I+32)^{0{,}2}}$.

Нетрудно видеть, что и в данном случае предельная концентрация твердого компонента в селевой массе потока монотонно зависит от уклона тальвега.

Отмечая большое практическое значение вопроса о предельно возможном содержании твердого компонента в селевых потоках, С. М. Флейшман [53], касаясь данной темы, излагает мнение М. А. Мосткова и И. И. Херхеулидзе и тем самым, по существу, солидаризируется с ними.

Основы теории формирования селей, возникающих при сдвиге каменистых осыпей (залегающих на уклонах, близких к углам естественного откоса) при их обводнении во время сильных дождей или катастрофического опорожнения водоемов, разработаны Р. Багнольдом (R. Bagnold) [122]. В соответствии с выдвинутой им концепцией сдвиг рыхлообломочных пород происходит, как правило, при полном заполнении пор грунта водой (грязью) и появлении поверхностного потока. К аналогичному выводу пришел и Ю. Б. Виноградов [118]. Т. Такахаши (T. Takahashi) [130], развивая концепцию Р. Багнольда о возможности аппроксимации селевой массы дилатантной средой, уточнил критерии возникновения селевых потоков и характеристики их движения. Анализ уравнений, полученных Р. Багнольдом и Т. Такахаши, показывает, что зависимость между уклоном селевого очага и концентрацией твердого компонента (при $\varphi_м^*$=*const*) в потоке непрерывна и однозначна.

На рисунке 7.1 приведены кривые, отображающие, по мнению И. Штини, М. А. Мосткова и Т. Такахаши, зависимость предельной объемной концентрации твердого компонента в селевой массе от уклона селевого очага. Несмотря на существенное различие в форме кривых, они относятся к одному и тому же классу непрерывных однозначных функций. При прогнозе развития селевых процессов указанное обстоятельство играет важную роль. Физическая интерпретация обсуждаемых зависимостей дает основание утверждать: концентрация твердого компонента в массе потока «... большая, нежели ... значение, определяемое соотношениями между уклоном и предельной концентрацией, ... невозможна ...» [6]. Другими словами, при перемещении потока с плотностью ρ_1 (образовавшегося на уклоне i_1) на уклон i_2 ($i_1 > i_2$) неизбежен частичный распад селевой массы до соответствующего данному уклону значения плотности ρ_2 ($\rho_2 < \rho_1$).

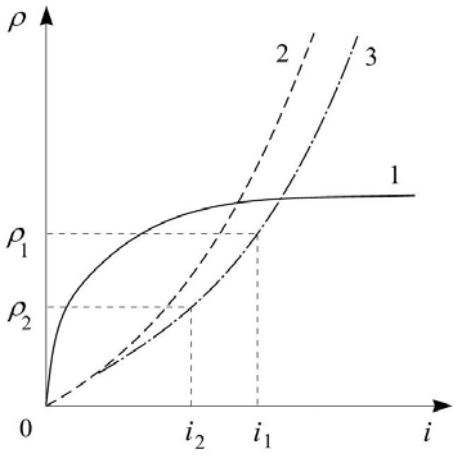


Рисунок 7.1. Зависимость предельной плотности селевой массы от уклона русла по: *1* – И. Штини; *2* – М. А. Мосткову; *3* – Т. Такахаши

Приведенные сведения о предельно возможной транспортирующей способности селей вступали в противоречие с данными наблюдений, свидетельствующими о том, что селевые потоки, плотность которых могла изменяться от 2300 до 2500 кг/м^3, перемещались на относительно малых уклонах ($sin\alpha$ колебался от 0,02 до 0,07) на десятки километров [23, 25]. Острота этого противоречия до конца 60-х годов сглаживалась установившимися к тому времени представлениями о существовании двух категорий селей: связных (структурных) и текучих (турбулентных) [151]. Возникновение селей первой категории (структурных, ламинарных, связных), движение всех частиц в которых происходит со средней скоростью потоков [179], увязывалось с переходом в текучее состояние водонасыщенных грунтов. Считалось, что сели второй категории (турбулентные, несвязные), скорость движения твердого и жидкого компонентов в которых различна [179], образуются в результате взаимодействия водного потока с рыхлообломочными породами, слагающими русло.

7.2. Природа процессов перемещения твердых частиц в составе селевого потока

Твердый компонент селевой массы может перемещаться скольжением, качением, сальтацией и во взвешенном состоянии. Способ перемещения твердого компонента определяется морфометрией пути движения селя, глубиной и расходом селевого потока, минералогическим и гранулометрическим составами, а также формой частиц твердого компонента селевой массы, его физико-механическими и реологическими характеристиками.

В каждой конкретной ситуации перемещение твердого компонента реализуется таким образом, чтобы затраты энергии на перенос были минимальными.

7.2.1. Перенос частиц в квазивзвешенном состоянии, обусловленном проявлением вязкопластических свойств селевой массы

Большинство исследователей относят плотные селевые потоки к связным (структурным) селям, их движение «... уже выходит за пределы тех движений, которые изучают в гидродинамике. Здесь мы наблюдаем как бы переход к «оплывине», в которой твердые составные части передают количество движения друг другу непосредственно, а чрезвычайно вязкая жидкость, заключенная в их порах, влияет лишь на силы сцепления, действующие между твердыми частицами, повышая или понижая их» [111]. В таких селях «... вследствие структурообразования, вызванного столь высокой вязкостью, глинистые растворы, начиная с определенной густоты, приобретают способность удерживать во взвешенном состоянии твердые тела, объемные веса которых превышают объемный вес раствора ...» [53].

Максимальный размер частиц $d_{кр}$, поддерживаемых в квазивзвешенном состоянии за счет пластичности среды, вмещающей упомянутые частицы, определяется по формуле, которая приведена в работе Б. В. Кизевальтера [180]:

$$d_{кр} = \frac{\tau_{см}}{0,21g(\rho_T - \rho_s)}, \tag{7.3}$$

где ρ_s – плотность суспензии, кг/м^3.

Уменьшение глубины потока, субстанция которого обладает вязкопластическими свойствами, может приводить к ее остановке. Превышение сдвигающих сил над удерживающими в вязкопластической среде происходит при выполнении условия

$$H \geq \frac{\tau_{см}}{\rho_{см} g \sin\alpha}, \tag{7.4}$$

где H – мощность (глубина) слоя, м.

Определим минимальный угол наклона подстилающей поверхности, необходимый для сдвижения слоя $H=d_{кр}$.

Приравняв формулу (7.3) к (7.4), после преобразований получим

$$\sin\alpha = \frac{0,21(\rho_T - \rho_s)}{\rho_{см}}. \qquad (7.5)$$

На рисунке 7.2 приведены зависимости между минимальными наклонами подстилающей поверхности α, необходимыми для движения слоя $H=d_{кр}$, и плотностью суспензии ρ_s для различных значений плотности селевых масс $\rho_{см}$. Плотность частиц $\rho_т$=2650 кг/м^3. Обращает на себя внимание сильная зависимость минимального наклона, на котором возможно движение, от разности плотностей твердых частиц $\rho_т$ и вмещающей их среды ρ_s.

В реальных условиях глубина потоков значительно (в несколько раз, а при $d_{кр}$ составляющем единицы, первые десятки сантиметров – в десятки раз) превышает значения $d_{кр}$. Это обстоятельство позволяет утверждать, что селевая масса, твердые частицы которой находятся в квазивзвешенном состоянии за счет пластичности среды, могут перемещаться без остановки и частичного распада на углах наклона подстилающей поверхности, составляющих доли градуса. Ярким тому примером служат сели в бассейне р. Сарыкан (Жетысу Алатау).

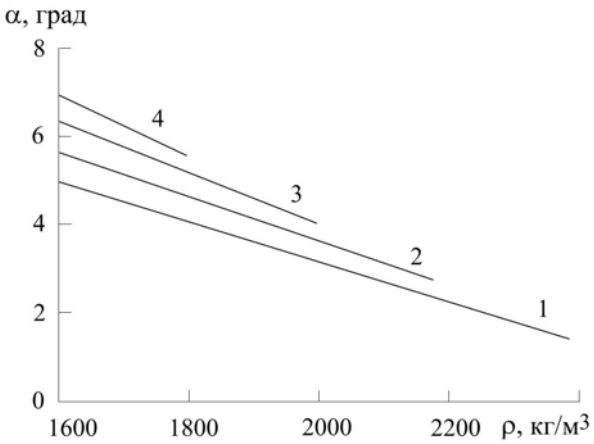


Рисунок 7.2. Зависимость между минимальным наклоном подстилающей поверхности, необходимым для движения слоя $H=d_{кр}$, при различных плотностях селевой массы и плотностью дисперсной среды: *1* – 2500 кг/м^3; *2* – 2300 кг/м^3; *3* – 2100 кг/м^3; *4* – 1900 кг/м^3

На рисунке 7.3 приведены типичные для Иле Алатау кривые, описывающие зависимости между минимальными уклонами, на которых перемещается селевая масса с различными минералогическими и гранулометрическими составами его твердого компонента, и плотностью селевой массы. Во всем диапазоне изменения плотности селевой массы предельные напряжения сдвига имеют значения, обеспечивающие нахождение всех крупностей частиц в квазивзвешенном состоянии.

Нетрудно видеть, что плотная селевая масса, представленная как лёссом предгорий, так и полидисперсными грунтами морен, может переме-

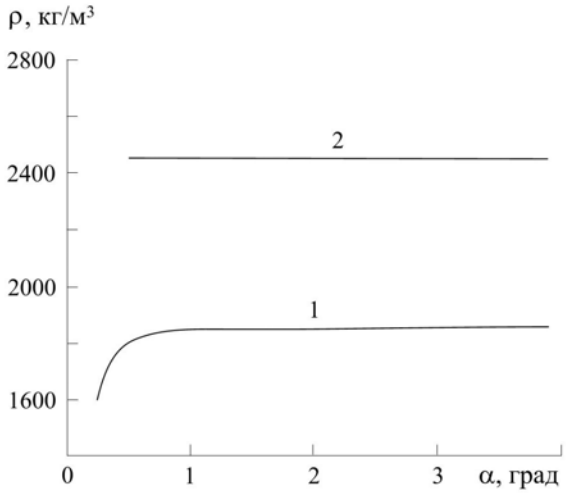


Рисунок 7.3. Зависимость между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором селевая масса может перемещаться без остановки и частичного распада. *1* – лёссовые породы, глубина потока 1 м; *2* – рыхлообломочные породы, типичные для четвертичных морен Иле Алатау, глубина потока 2,5 м

щаться на большие расстояния (десятки километров) на уклонах, характерных для конусов выноса горных рек, на которых построены населенные пункты порой с миллионным населением. Дальность продвижения селей в таких ситуациях определяется не столько уклоном русел, сколько объемом селей, ибо на всем пути их продвижения происходит отложение селевой массы; при этом мощность отложений определяется уравнением (7.4).

Плотные сели, образующиеся в результате потери устойчивости водонасыщенных лёссовых массивов, связаны, как правило, с сейсмической деятельностью в горных районах. Мощные селевые явления в лёссах предгорий Иле Алатау наблюдались во время землетрясения 1887 г. Подробное описание селей, объем которых составлял десятки миллионов кубометров, представлено в публикации И. В. Мушкетова [47]. Наиболее разрушительные сейсмогенные явления в лёссовом поясе на территории СНГ за последнее время наблюдались близ г. Душанбе в 1989 г. И в том, и в другом случаях влажность селевой массы была близка к верхнему пределу пластичности (границе текучести).

Полярной противоположностью описанным селям является перенос наносов р. Хуанхэ и ее притоками. Максимальное содержание твердого компонента зарегистрировано в притоках, бассейны которых примыкают к Лёссовому плато. Грунты Лёссового плато состоят из 6 % песка, 60 % ила, 34 % глины [181].

По данным T. Ree & H. Eyring [182], в период паводков в этих реках наблюдается гиперконцентрация наносов: содержание твердых частиц достигает 400–1000 кг/м^3. Результаты измерений мутности по 187 вертикалям в 7 створах шести основных притоков р. Хуанхэ показали, что концентрация наносов практически не изменяется от дна до поверхности [S=(0,95–1,06)$S_{ср}$,

где $S_{ср}$ – среднее содержание наносов по вертикали]. Объяснение тому авторы упомянутой работы видят в проявлении у образующихся селевых масс свойства пластичности, благодаря чему отпадает необходимость в поддержании частиц во взвешенном состоянии за счет турбулентного перемешивания в потоках.

Принимая во внимание, что содержание твердого компонента 1000 кг ($\rho_т$=2650 кг/м^3) в 1 м^3 селевой массы соответствует ее плотности 1623 кг/м^3, нетрудно прийти к выводу: в описываемой ситуации мы имеем дело не с мутными потоками, а с грязевыми селями, перемещающимися на сотни километров на уклонах менее одного градуса.

Ярко выраженными вязкопластическими свойствами обладает и селевая масса, твердый компонент которой представлен продуктами разрушения сланцев, либо когда имеет место частичное замещение (обогащение) продуктов разрушения интрузивных и эффузивных пород продуктами разрушения глинистых сланцев. Последняя ситуация имеет место в Жетысу Алатау, где сели, формирующиеся на моренах основного хребта, сложенного гранитоидами, проходят через среднегорную зону, состоящую из глинистых сланцев.

Таким образом, наличие у селевой массы выраженных вязкопластических свойств обусловливает перемещение частиц практически всех крупностей в квазивзвешенном состоянии, не требующем для этого затрат энергии потока. Пластичная селевая масса может перемещаться без остановки и частичного распада на уклонах, составляющих доли градуса; дальность продвижения селей определяется их объемом, морфометрией пути движения, свойствами селевой массы.

7.2.2. Роль кулоновского трения в процессе движения селевой массы

В ситуациях, когда в силу особенностей минералогического и гранулометрического составов твердого компонента, недостаточной концентрации частиц селевая масса не приобретает ярко выраженных вязкопластических свойств, условия существования селевой массы существенно изменяются. При достижении концентраций твердого компонента в селевых массах, при которых качение частиц становится энергетически невыгодным, частицы образуют относительно твердый скелет, опирающийся на дно русла, при этом сопротивление движению селевых масс имеет преимущественно кулоновскую природу.

Сила кулоновского трения $F_{тр}$, как известно, зависит от коэффициента трения f и нормального давления $P_н$:

$$F_{тр} = fP_н . \qquad (7.6)$$

Для определения коэффициентов трения в зависимости от условий на контакте «селевая масса – подстилающая поверхность» в КазНИГМИ в 1982–1983 гг. проведена серия опытов. Блок-схема экспериментальной установки, с помощью которой определялись коэффициенты трения, показана

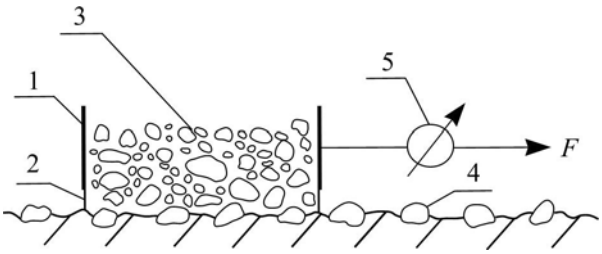


Рисунок 7.4. Схема измерения коэффициента трения при движении селевой массы.
1 – короб размером 1000×1000×400 мм; *2* – резиновый кожух; *3* – булыжники;
4 – выступы шероховатости поверхности скольжения; *5* – динамометр

на рисунке 7.4. Короб *1* с размерами 1000×1000×400 мм, заполненный булыжниками *3*, с помощью лебедки перемещался по бетонной поверхности с различной скоростью. Выступы шероховатости поверхности скольжения не превышали 0,5–1 мм. Сила трения измерялась динамометром *5*. Вес булыжников изменялся от 150 до 300 кг.

Обработка результатов наблюдений показала, что коэффициент трения сухих булыжников об относительно гладкую бетонную поверхность $f_{сух}$=0,57±0,03. Смачивание булыжников водой практически не изменяет величины коэффициента трения – f=0,55±0,03.

В несколько большей мере на коэффициент трения влияет смазывание подстилающей поверхности суспензией. Толщина слоя смазки достигала 50 мм, наибольший размер частиц, входивших в ее состав, не превышал 20 мм; минералогический и гранулометрический составы твердого компонента суспензии соответствовали таковым усеченного состава селевой массы, сформировавшейся в бассейне р. Улькен Алматы в 1977 г., плотность суспензии изменялась от 2100 до 2150 кг/м^3.

Коэффициент трения колебался от 0,47 до 0,51 при скорости перемещения короба от 0,05 до 0,25 м/с. Следует заметить, что при обработке результатов описываемых наблюдений не учитывалось действие архимедовой силы, в определенной мере уменьшающей величину нормального давления, так что реальное изменение коэффициента трения за счет смазки суспензией вряд ли превышает 10 % от его значения для условий «сухого» трения.

В диссертации Е. К. Рабковой упоминается о возможности существенного уменьшения коэффициента трения за счет глинистых прослоек между крупными фракциями рыхлообломочных пород и руслом [183]. Принципиальных возражений эта гипотеза не вызывает, однако для ее реализации необходимо выполнение ряда условий:

суспензия должна представлять собой глинистый раствор, в котором отсутствуют песок и гравий;

частица, перемещающаяся скольжением, должна иметь плоскую контактную поверхность;

русло также должно быть плоским, причем выступы шероховатости не должны превышать долей миллиметра.

Только при одновременном соблюдении указанных требований, в соответствии с выводами гидродинамической теории смазки [105], при относительно низких значениях реальных скоростей перемещения частиц (1–5 м/с), возможно увеличение давления в слое смазки до таких величин, при которых возникает существенное уменьшение нормального давления и, следовательно, кулоновское трение или даже взвешивание частиц при этом будет определяться вязкопластическими свойствами смазки.

Величина коэффициента трения существенно возрастает, если шероховатость русла становится соизмеримой с размерами крупных частиц, входящих в состав твердого компонента селевой массы. Так, при движении короба с булыжниками по бетонной поверхности с вкраплениями гальки (размер выступов 20–30 мм, расстояние между выступами шероховатости 120–150 мм) кажущееся (эффективное) значение коэффициента трения (включающего в себя действие зацепления частиц селевой массы с шероховатостями подстилающей поверхности) изменялось от 0,8 до 1,14.

Приведенные данные о коэффициентах трения могут быть отнесены к статическим характеристикам трения, поскольку они получены при относительно медленных перемещениях селевой массы. Однако динамические коэффициенты трения незначительно отличаются от статических. Так, по данным Ю. Б. Виноградова, при расчетах в качестве исходных данных могут быть приняты следующие значения динамического угла внутреннего трения рыхлообломочной породы под водой:

а) речной аллювий: песок 8–23°, галька 23–28°, валуны 28–35°;

б) типичные ПСМ в очагах взаимодействия 30–38°.

Таким образом, в рамках общепринятых представлений о механизме кулоновского трения не существует предпосылок для резкого (в 3–5 раз) уменьшения коэффициента трения, благодаря которому селевая масса большой плотности могла бы перемещаться скольжением на уклонах 2–3° за счет уменьшения ее потенциальной энергии.

Анализируя условия, приведшие к «аномально» большим дальностям выноса материала рядом крупномасштабных обвалов горных пород и оползней, С. С. Григорян [184] пришел к выводу о существовании механизма перемещения грунтов, отличного от ранее предлагавшихся для объяснения упомянутых феноменов. По мнению С. С. Григоряна, повышенная подвижность описываемых объектов объясняется эффектом срезания малопрочного верхнего слоя грунта движущейся массой. Этот эффект позволяет ввести ограничения на величину касательных напряжений τ, возникающих на контакте потока с основанием:

$$\tau = \begin{cases} fP_н & fP_н \le \tau_*, \\ \tau_* & fP_н > \tau_*, \end{cases} \tag{7.7}$$

где τ_* – характеристика прочности на срез более слабого из трущихся материалов.

Приближенные «обратные» расчеты позволили С. С. Григоряну оценить величину параметра τ_*. Оказалось, что согласно предложенной модели

разрушение подстилающей поверхности происходит при напряжениях, изменяющихся от 0,2 до 1 кг/см^2. Нетрудно показать, что даже при наиболее низком значении параметра τ_*=0,2 кг/см^2 движение массы на малых уклонах (например, 3°) становится возможным лишь при весьма значительных глубинах потоков. Так, при средней плотности массы 2500 кг/м^3 глубина потока должна превышать 16 м.

Поскольку селевые потоки с плотностью 2300–2500 кг/м^3 перемещаются на многие километры на уклонах 2–3° в слоях 1–3 м, механизм их движения не может быть объяснен «срезом» подстилающих поверхностей, представленных к тому же пролювиально-аллювиальными и пролювиальными отложениями, в составе которых могут находиться частицы с размерами, превышающими один метр.

Сила кулоновского трения, как это следует из формулы (7.6), может быть уменьшена за счет соответствующего изменения нормального давления. В свою очередь, величина нормального давления твердых частиц на дно зависит от массы частиц, контактирующих с ним, а также архимедовой силы, действующей на частицы:

$$P_н = C_{жт} g \left(\rho_T - \rho_s \right) H \cos \alpha, \tag{7.8}$$

где $C_{жт}$ – концентрация твердых частиц в селевой массе, контактирующих с руслом.

Эксперименты КазНИГМИ по определению силы трения в условиях, когда булыжники были погружены в воду или селевую суспензию, полностью подтвердили правомерность использования для расчета сил трения формулы

$$F_{тр} = C_{жт} g H f \left(\rho_T - \rho_s \right) \cos \alpha. \tag{7.9}$$

Следует иметь в виду, что последняя формула может применяться лишь в тех случаях, когда суспензию допустимо аппроксимировать «тяжелой» жидкостью, обладающей относительно невысоким значением $\tau_{см}$.

В случаях, когда статическое напряжение сдвига селевой массы принимает значения, при которых крупные фракции твердого компонента совместно с остальной частью селевой массы образуют структуру, препятствующую возникновению локальных деформаций, например изменению положения одних частиц относительно других в процессе взаимодействия их с элементами шероховатости русла, рассматриваемая картина качественно изменяется. Так, в упомянутых экспериментах при плотности суспензии 2230 кг/м^3 и τ_0=530 Н/м^2 страгивание короба, загруженного 287 кг булыжников, произошло лишь при приложении силы (3750±100) Н, после чего для поддержания процесса движения со скоростью 0,03–0,2 м/с требовалось приложение силы 2500–2700 Н.

Энергичное постукивание по боковым стенкам короба приводило к разрушению общей структуры и резкому уменьшению силы, необходимой для его сдвижения практически до значений, которые требовались для сдвига, когда в нем находилась только суспензия (700 Н). Заметим, что аналогичное воздействие в случаях заполнения короба сухими булыжниками,

погруженными в воду или суспензию с малыми значениями τ_0, практически не изменяло коэффициента трения.

Вероятно, именно описанным механизмом образования твердого скелета объясняется резкое торможение вышедшего за пределы русла реки селевого потока на р. Улькен Алматы в 1977 г. Слой селевой массы толщиной 1–1,5 м (в его состав входили глыбы размером 1–2 м) остановился столь энергично, что булыжники, находившиеся близко к поверхности слоя, были сброшены инерционными силами. Вся площадь перед остановившимся валом шириной 7–10 м была буквально усеяна камнями, покрытыми тонким слоем грязи. Плотность селевой массы характеризует тот факт, что никаких признаков водоотдачи остановившейся селевой массы (крутизна переднего фронта вала – 40–45°) обнаружено не было (рисунки 7.5, 7.6).

Рисунок 7.5. Отложения селевого потока в 1977 г. в бассейне р. Улькен Алматы. Остановка селевой массы произошла столь быстро, что находившиеся в поверхностном слое крупные частицы по инерции пролетели (прокатились) еще несколько метров

Важную роль в формировании значения критического уклона, т.е. уклона, на котором возможен сдвиг водонасыщенных пород, играет гранулометрический состав и плотность частиц, участвующих в селеформировании. Чем однородней по размерам и форме частицы, тем больше пористость твердого скелета, образуемого ими, и, следовательно, меньше угол наклона, на котором реализуется сдвиг.

Мощные толщи рыхлообломочных отложений приобретают возможность перемещения на относительно малых уклонах, если они залегают на подстилающей поверхности, имеющей невысокие характеристики на срез (например, увлажненные глины, погребенные почвенные слои и т.д.). При

Рисунок 7.6. Отсутствие признаков водоотдачи остановившейся селевой массы. «Снежки», вылепленные из грязевого компонента, сохраняли свою форму

этом сопротивление сдвигу практически не зависит от величины нормального давления (т.е. оно теряет кулоновскую природу) и подчиняется закономерностям, описанным С. С. Григоряном.

7.2.3. Перенос частиц во взвешенном состоянии, обусловленный процессами перемешивания в движущейся селевой массе

Формирование селей в результате взаимодействия сосредоточенного водного потока с рыхлообломочными породами, способных к перемещению на относительно малых уклонах, теснейшим образом связано с противоборством двух сил: силы тяжести и взвешивающей силы. Под взвешиванием частиц понимается процесс, при котором частицы теряют контакт с руслом. Взвешивание частиц изменяет свойства массы потока, увеличивая ее вязкость и плотность. Изменение плотности приводит к соответственному изменению влекущей и архимедовой сил, уменьшению гидравлической крупности частиц из-за увеличения степени стесненности их падения, а повышение вязкости – к росту сил сопротивления движению потока и снижению гидравлической крупности твердых частиц.

Движение водного потока в локальном селевом очаге, в силу его турбулентности, приводит к взвешиванию частиц, гидравлическая крупность которых меньше вертикальных составляющих скорости потока (более крупные частицы перемещаются путем сальтации и качения). Взвешивание частиц и придание им кинетической энергии сопровождается уменьшением

энергии потока, однако падение частиц приводит к увеличению последней, что компенсирует первоначальные потери. Ход процесса определяется тем, к чему привело взвешивание частиц. Если энергия, отдаваемая частицами, превышает энергию, затраченную потоком на вовлечение их в движение, а увеличение вязкости не привело к существенному росту сил сопротивления движению потока, энергия потока возрастает. Это приведет к дальнейшему росту концентрации твердых частиц в потоке, создавая условия для взвешивания частиц с большей гидравлической крупностью за счет увеличения вертикальных составляющих скорости, вязкости селевой массы и архимедовой силы. Насыщение потока твердым компонентом вследствие турбулентного перемешивания прекращается, когда повышение концентрации твердых частиц, сопровождаемое ростом вязкости и разрушением турбулентности, способствует установлению динамического равновесия в компонентном составе селевой массы.

До какой же степени возможно насыщение потока твердым компонентом в результате турбулентного взвешивания частиц? На этот вопрос невозможно ответить однозначно, поскольку решающая роль в описываемом процессе принадлежит минералогическому и гранулометрическому составам селеформирующих пород и характеристикам потока.

В настоящее время широко распространено сложившееся в 40–50-е годы представление о том, что уже при незначительной объемной концентрации твердого компонента турбулентное перемешивание селевой массы прекращается. Так, И. В. Егиазаров [99], ссылаясь на Р. Багнольда, писал: «При концентрации 35 % турбулентные пульсации совершенно прекращаются. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к «замораживанию», затору всей массы взвешенных наносов, примерно при 57 % по объему». К такому же выводу пришел в результате теоретических исследований М. А. Великанов [74]. И. И. Херхеулидзе, базируясь на опытах Р. Багнольда, Г. Л. Фриша и Р. Симха и др., считал [100], что «... наиболее плотная упаковка, при которой еще может иметь место непрерывное движение», составляет 0,52, «... в качестве достаточно реального верхнего предела объемной концентрации, при превышении которого уже невозможен какой-либо вид течения селевой массы (но при достаточном уклоне возможно скольжение ее как квазитвердого тела), в первом приближении для случая отсутствия или малого содержания коллоидных фракций можно принять S_{nm}=0,650–0,705». Примерно такого же мнения придерживался М. С. Гагошидзе: «... Селевой поток не может быть турбулентным при объемной концентрации свыше 35–40 %, тогда как при селевом состоянии объемная концентрация превышает 60 %. Следовательно, при разрушении селевого состояния 20–25 % твердых включений должны немедленно выпасть» [151].

Основными причинами, приведшими к отрицанию возможности существования турбулентного режима движения селей, объемная концентрация твердого компонента в которых превышает 40 %, послужили неправильная интерпретация экспериментальных данных, полученных при изучении свойств суспензий, а также недооценка роли полидисперсности грануло-

метрического состава селеформирующих пород. Опытные данные, привнесенные в селеведение из других областей науки, получены при работе с суспензиями, твердый компонент которых был представлен в основном однородными по величине шарообразными частицами. Насколько существенно отличаются свойства двухкомпонентной селевой массы при одной и той же концентрации твердого компонента, но различном гранулометрическом составе, иллюстрирует пример, приведенный на рисунке 7.7.

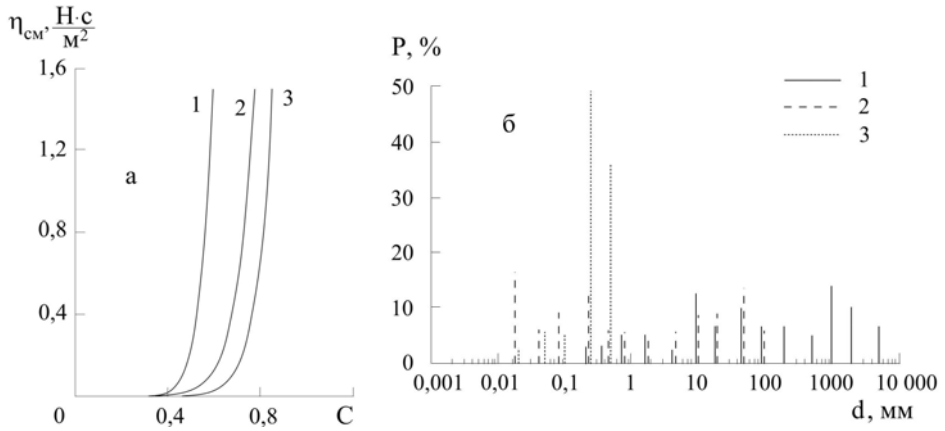


Рисунок 7.7. Зависимость вязкости селевой массы от концентрации твердого компонента для различных гранулометрических составов.
а – зависимость вязкости селевой массы от концентрации;
б – гранулометрический состав соответствующих грунтов:
1 – пустыни Жаманкум; *2* – Ферганских адыров;
3 – Шамалганского селевого очага (Иле Алатау)

Свойства селевой массы изучались либо на моделях, либо с использованием реальных грунтов с сильно усеченным (в области крупных частиц) гранулометрическим составом. Перенос без должного обоснования получаемых данных на реальные селевые массы приводил к недопустимо большим погрешностям оценки свойств селевых масс.

Важную роль в формировании характеристик перемешивания селевой массы в процессе ее движения играет шероховатость русла. Взаимодействие потока с элементами шероховатости, размеры которых, как правило, соизмеримы с глубиной потока, создает условия для квазидетерминированного перемешивания массы, по своей эффективности значительно превышающие возможности перемешивания, обусловленные классической турбулентностью.

Наибольшие успехи в разработке методов расчета предельной концентрации твердого компонента в потоках достигнуты для ситуаций, когда частицы представлены пылевато-песчаными фракциями, а уклон русла существенно меньше 1°. В этих случаях для расчета характеристик селей могут использоваться методы теории транспорта наносов. Наиболее разработанной теорией взвешивания наносов является диффузионная теория, основы которой были заложены Д. Тейлором и В. Шмидтом. Свое развитие

она получила в трудах В. М. Маккавеева и И. М. Коновалова [185], М. А. Великанова [98], А. В. Караушева [107], И. И. Леви [186], И. Ф. Карасева [187], В. Ванони (V. Vanoni) [188], Г. И. Шамова [189] и др.

Широко известна в 40–50-е годы была гравитационная теория движения взвешенных наносов М. А. Великанова, в которой была предпринята попытка учета работы, затрачиваемой потоком на взвешивание частиц [98]. Наибольшей критике в упомянутой теории подверглась гипотеза о том, что энергия, затрачиваемая на взвешивание тяжелых частиц, черпается из энергии осредненного движения потока [191, 192]. Теория Г. И. Баренблата [190], как и теория М. А. Великанова, распространяется на потоки малой мутности, транспортирующие мелкие взвешенные частицы. Фундаментальная роль в исследовании взвесенесущих потоков принадлежит Ф. И. Франклю [193].

Анализируя упомянутые теории, а также их модификации, А. В. Караушев [107] приходит к выводу о том, что «... в настоящее время диффузионная концепция взвешивания наносов является единственной приемлемой теоретической основой изучения движения взвешенных наносов в реках».

Дальнейшее развитие теория транспорта твердого компонента селевых потоков получила в работах В. Г. Санояна. Базируясь на идеях гравитационной теории М. А. Великанова и учитывая критику в адрес последней Ф. И. Франкля, А. Н. Колмогорова, Г. И. Баренблата и др., а также используя результаты экспериментов, выполненных в АрмНИИВПиГ, В. Г. Саноян [116] получил уравнение транспортирующей способности потоков в случаях стационарного равномерного движения, стационарного неравномерного движения, нестационарного движения. Анализ этих уравнений позволил В. Г. Санояну и его соавторам предложить ряд интересных конструкций селезадерживающих и селепропускных сооружений, а также разработать схему расчета характеристик селей.

Основным недостатком упомянутой схемы, по нашему мнению, является отсутствие критериев, определяющих максимальные размеры частиц, перемещаемых потоком во взвешенном состоянии. Оперирование «средними» размерами частиц, вычисляемыми по данным о полном гранулометрическом составе руслоформирующих пород, не может не приводить к завышению реальных средних размеров частиц и, следовательно, к занижению предельно возможных значений концентрации твердого компонента в потоках.

Поскольку в теоретических построениях и расчетных формулах В. Г. Санояна [115] не учитывается изменение гидравлической крупности частиц при увеличении концентрации твердого компонента в селевой массе, можно утверждать, что хорошая сходимость результатов расчетов с реальными значениями возможна лишь для относительно малых значений объемной концентрации (C=0,1–0,2).

Методы теории транспорта наносов описывают относительно простые процессы, в которых преобладают отрицательные обратные связи. Селевые явления относятся к более сложному классу процессов, ход которых определяется действием как отрицательных, так и положительных обратных

связей; причем они могут характеризоваться как преобладанием отрицательных обратных связей над положительными, так и положительных обратных связей над отрицательными. Соотношение этих связей определяется морфометрией пути движения селевых потоков и их характеристиками, физико-механическими характеристиками и реологическими свойствами селевой массы в целом, а также свойствами, которыми обладают составные части селевой массы по отношению к частицам, для которых они являются вмещающей средой и т.д.

И хотя в решении проблемы реологии селевой массы сделаны лишь первые шаги, можно утверждать, что ключевой задачей создания теории существования селевой массы большой плотности является определение мощности, которая может быть затрачена потоком на перемещение во взвешенном состоянии частиц с плотностью, превышающей таковую вмещающей среды.

7.3. Модель состояния селевой массы

Гипотеза о неоднозначной зависимости между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором селевая масса может существовать без остановки и частичного распада, впервые публично изложена на XV Всесоюзной научно-технической конференции по противоселевым мероприятиям в г. Ташкенте (1978 г.). За истекший период различные аспекты теории существования селевой массы неоднократно освещались в научной печати [125, 194, 195], на всесоюзных съездах и конференциях. К сожалению, неординарность явления, не имеющего аналогов в гидрологии, и до настоящего времени вызывает неверие в возможность его существования, что серьезнейшим образом сказывается на эффективности селезащитных мероприятий.

Любое математическое описание сложного многофакторного процесса не более чем модель этого процесса, поэтому стратегию доверия результатам моделирования селевых явлений следует, по нашему мнению, базировать на оценке достоверности описания реальных процессов (пусть даже постфактум), данные о которых не использовались при разработке модели. Наиболее убедительным доказательством жизнеспособности моделей является экспериментальное подтверждение выводов, получаемых путем моделирования. Однако возможности существенного изменения важнейших параметров искусственных селевых процессов (уклон и длина селевого очага, состав рыхлообломочных пород и т.д.), воспроизводимых в реальных масштабах, крайне ограничены. В особой мере это относится к экспериментальному подтверждению нетривиальных выводов теории существования селевой массы.

Сложившаяся ситуация предопределила характер исследований по выявлению степени адекватности положений, выдвигавшихся при разработке теории существования селевой массы, реальным природным процессам.

Сопоставительный анализ данных о селевых явлениях, наблюдавшихся в различных районах мира, и основополагающих концепций теории суще-

ствования селевой массы свидетельствует о том, что все особенности селевых явлений находят объяснение в рамках упомянутой теории. С ее помощью удается решать многие спорные вопросы селеведения, например определить границы применимости гидравлического способа борьбы с селями, разработанного М. С. Гагошидзе и вызвавшего активные дискуссии в 60-х годах нашего столетия.

Как уже отмечалось, сложность селевых явлений затрудняет описание основных положений теории существования селевой массы фундаментальными уравнениями математической физики, однако для ситуаций, представляющих практический интерес, строгое доказательство существования отрицательного наклона у *Z*-функций возможно на аксиоматической основе.

7.3.1. Аксиоматическое доказательство отрицательного наклона у кривой равновесных состояний для вязкопластичной селевой массы

Уровень современных знаний об условиях формирования селей и свойствах селевой массы позволяет постулировать следующие положения:

сосредоточенный водный поток с расходом больше критического значения при определенных условиях (достаточное количество рыхлообломочных пород, имеющих широкий спектр размеров частиц, и уклон больше критического) трансформируется в селевой поток с большой плотностью;

селевые потоки большой плотности (2300–2500 кг/м^3), твердый компонент которых представлен полидисперсными частицами, включающими валунно-глыбовые фракции, не образуются на относительно малых уклонах (1–5°);

селевой процесс как отклик сложной системы «русло (селевой очаг) – поток» при $t\to\infty$ (или $l\to\infty$) и $\alpha=const$ стремится к динамическому равновесию, которое характеризуется таким состоянием селевой массы, при котором не происходит изменение ее плотности;

селевая масса, обладающая пластическими свойствами в мере, достаточной для того, чтобы все частицы ее твердого компонента находились в квазивзвешенном состоянии, перемещается без распада и остановки при выполнении условия

$$H > \frac{\tau_{см}}{\rho_{см} g \sin\alpha}; \qquad (7.10)$$

реологические свойства селевой массы (вязкость, предельное напряжение сдвига) и скорость их распада (до образования твердого скелета) являются непрерывными функциями плотности селевой массы.

Утверждение, подлежащее доказательству, сформулируем следующим образом: зависимость между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором сели перемещаются без распада и остановки, имеют участок с отрицательным наклоном, если гранулометрический и минералогический составы твердого компонента таковы, что селевая масса при большой плотности обладает свойством пластичности в мере, достаточной

для того, чтобы частицы (включая валуны и глыбы) находились в квазивзвешенном состоянии.

Для доказательства приведенного утверждения допустим, что зависимость между плотностью селевой массы (для *H=const*) и минимальным уклоном, на котором селевая масса перемещается без распада и остановки, описывается однозначной функцией $\rho_{см}=\rho(i)$, причем $\frac{\partial\rho}{\partial i}>0$ (отрезок *OAC*, рисунок 7.8), что не противоречит первому, второму и третьему положениям. При этом точка *C* соответствует плотности селевой массы, при которой она теряет свойство текучести: деформация происходит с разрывом сплошности, сель трансформируется в оползень или обвал.

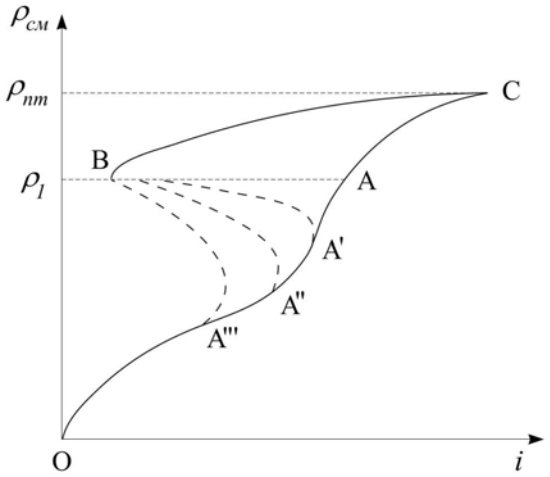


Рисунок 7.8. К доказательству существования отрицательного наклона у кривой равновесных состояний

В то же время согласно четвертому положению (в условиях проявления у селевой массы вязкопластических свойств) имеет место функция, показанная на рисунке 7.8 кривой *BC* (*H=const*) и отображающая зависимость между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором сель еще не трансформируется в оползень (переписав неравенство (7.10) в виде

$$\sin\alpha > \frac{\tau_{см}}{\rho_{см} g H}, \qquad (7.11)$$

нетрудно сделать вывод о том, что изменением величины *H* легко добиться, чтобы значение $sin\alpha$ принимало сколь угодно малое значение. Именно это значение *H* и принимается при построении кривых *OAC* и *BC*).

Анализ положения кривых *OAC* и *BC* на координатной плоскости (ρ, *i*) приводит к выводу, что функция $\rho_{см}=\rho(i)$ при плотностях ρ_l–$\rho_{пт}$ характеризуется ветвями *AC* и *BC*. Поскольку искомая функция – зависимость между плотностью селевой массы и минимальными уклонами, на которых она

существует без остановки и распада, представляется очевидным, что отрезок *AC* не может принадлежать искомой функции. В указанном диапазоне плотности селевой массы она характеризуется ветвью *BC*.

Остается решить вопрос о характере перехода отрезка *OA* в отрезок *BC*. Поскольку скачкообразный переход функции $\rho(i)$ из точки *A* в точку *B* запрещен пятым положением (свойства селевой массы не могут изменяться на конечную величину при бесконечно малом изменении ее плотности), функция $\rho(i)$, не доходя до точки *A*, постепенно переходит в функцию, показанную отрезком *BC*. Например, как это изображено штрих-пунктиром на рисунке 7.8, образуя участок с отрицательным наклоном, что и требовалось доказать.

Характер перехода отрезка *OA′* (*OA″*, *OA‴* и т.д.) в отрезок *BC* определяется параметрами потока и закономерностями изменения свойств селевой массы по мере увеличения их плотности. Участок *AC* появляется в случаях, когда превалирующая роль в сопротивлении движению селевой массы играет кулоновская сила, либо увеличение концентрации взвешенных частиц приводит к интенсивному гашению турбулентного перемешивания, что характерно для потоков, имеющих малые глубины. Естественно, при этом исчезает ветвь *A′BC*.

7.3.2. Математические модели состояния селевой массы в отсутствие свойства пластичности

Процесс взаимодействия потока с руслом (селевой процесс) сопровождается трансформацией характеристик селя, с одной стороны, и изменением морфометрических характеристик русла – с другой. Факторы, управляющие процессом взаимодействия (управляющие параметры системы), – это морфометрия русла (уклон, ширина и форма), физико-механические характеристики пород, слагающих русла, такие, как гранулометрический состав обломков, пористость, влажность, минералогия тонкодисперсного компонента. Кроме того, на течение процесса (эволюцию селевого потока) влияет предыстория потока (его расход, кинематические и реологические характеристики). Учесть влияние столь большого числа факторов при описании селевого процесса в терминах классической динамики, как отмечалось, не представляется возможным. В таких ситуациях хорошие результаты при описании принципиально важных сторон процессов дает энергетический метод.

Как было показано, взаимодействие потока с селеформирующими породами приводит к изменению энергии потока и одновременно к изменению состава и характеристик селевой массы, т.е. состояния селевой массы. Поэтому естественно рассматривать селевой процесс как эволюцию системы «русло – сель» через изменение состояния селевой массы.

Выделим главные параметры, отвечающие за состояние селевой массы, индикатором которой является ее плотность: расход потока, уклон русла, его ширина и форма, гранулометрический и минералогический составы твердого компонента селевой массы.

Определим динамическое равновесие системы «русло – сель». Состояние устойчивого равновесия характеризуется тем, что селевая масса, обладающая некоторой плотностью, может существовать без распада и остановки на определенном уклоне при временном отклонении плотности от равновесного значения. Состояние неустойчивого равновесия характеризуется тем, что происходит либо распад и в дальнейшем затухание селевого процесса, либо набор рыхлообломочных пород и дальнейшее развитие селевого процесса, т.е. бесконечно малое отклонение плотности селевой массы от такового (при равновесии) приводит со временем к конечному изменению (в ту или иную сторону) плотности селевой массы. Обычно для исследования устойчивости системы «русло – сель» анализируются равновесные решения эволюционного уравнения в области критических значений параметра.

В самом простом случае одномерной задачи уравнение эволюции селевой массы имеет вид

$$\frac{d\rho}{dl} = F(\rho, \alpha). \tag{7.12}$$

Устойчиво равновесным является решение, к которому стремится $\rho(l)$ при $l \to \infty$.

Функцию $F(\rho, \alpha)$, т.е. кривую равновесных состояний (получившей название Z-функции), найдем из принципа минимизации энергии, затрачиваемой потоком на перемещение твердого компонента селевой массы во взвешенном (квазивзвешенном) состоянии:

$$N_{п.взв} = N_{взв}, \tag{7.13}$$

где $N_{п.взв}$ – мощность потока, которая может быть затрачена на перенос частиц во взвешенном состоянии; $N_{взв}$ – мощность, необходимая для поддержания твердого компонента во взвешенном состоянии.

Следуя энергетическому подходу, определим зависимость концентрации твердого компонента в потоке от уклона русла в предположении о преобладающей роли кулоновского трения. Пусть мы имеем дело с равномерно движущимся потоком. Тогда изменение потенциальной энергии единицы объема W селевого потока при его перемещении в направлении движения на величину ΔL можно определить из выражения

$$\Delta W_n = \rho_{см} W g \Delta L \sin\alpha. \tag{7.14}$$

Работа, затрачиваемая на преодоление силы трения, равна

$$A_f = g C_k tg\varphi W (\rho_T - \rho_s) \cos\alpha \Delta L, \tag{7.15}$$

где C_k – объемная концентрация твердого компонента, образующего твердый скелет, опирающийся на дно; ρ_s – плотность суспензии (воды), кг/м^3.

Приравнивая величину изменения приращения потенциальной энергии ΔW_n к значению работы, затрачиваемой на преодоление сил трения, получаем зависимость между концентрацией твердого компонента в потоке и минимальным уклоном, на котором поток имеет возможность перемещаться:

$$tg\alpha = \frac{C_k(\rho_T - \rho_s) tg\varphi}{\rho_{см}}. \tag{7.16}$$

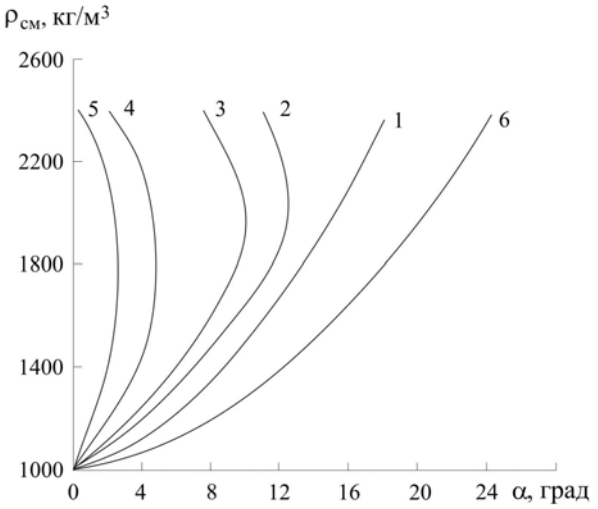


Рисунок 7.9. Зависимость плотности селевой массы от уклона
при различном содержании взвешенных частиц.
Расчет по формуле (7.22): 0 % (*1*); 10 % (*2*); 20 % (*3*); 50 % (*4*); 75 % (*5*) при tg φ =0,55;
расчет по формуле Багнольда (7.18): (*6*) при tg φ =0,75

На рисунке 7.9 (кривая *1*) показаны результаты вычислений по приведенной формуле в предположении, что вся энергия потока затрачивается на преодоление кулоновского трения. Нетрудно видеть, что полученная зависимость однозначна, увеличение концентрации твердого компонента наблюдается лишь по мере роста уклона, из чего следует, что плотные селевые потоки, сопротивление движению которых обусловлено кулоновским трением, могут перемещаться на относительно малых уклонах лишь за счет кинетической энергии.

Идентичное уравнение получено ранее Р. Багнольдом [122] из условия равенства сдвигающей и удерживающей (водонасыщенный массив грунта) сил

$$g \sin\alpha\{\rho_s + (\rho_T - \rho_s)C\}y = gtg\varphi \cos\alpha(\rho_T - \rho_s)Cy, \qquad (7.17)$$

$$tg\alpha = tg\varphi \frac{(\rho_T - \rho_s)C}{\rho_s + (\rho_T - \rho_s)C}. \qquad (7.18)$$

Т. Такахаши рассмотрена ситуация, при которой концентрация твердого компонента в селевой массе стабилизируется как в результате эрозионных процессов, так и отложения наносов [196]:

$$C = \frac{\rho_s tg\alpha}{(\rho_T - \rho_s)(tg\varphi - tg\alpha)}. \qquad (7.19)$$

Б. С. Степанов и Т. С. Степанова описали ситуацию, при которой (в процессе сдвига водонасыщенных массивов горных пород) часть грунта при разжижении образует суспензию [4], плотность которой может значительно превышать плотность воды. Увеличение архимедовой силы и

уменьшение объема частиц, принимающих участие в возникновении силы, имеющей кулоновскую природу и препятствующей движению потока, может приводить к ситуации, при которой кривая зависимости плотности селевой массы от уклона русла приобретает отрицательный наклон. В этом случае упомянутая зависимость становится неоднозначной (рисунок 7.9), селевая масса имеет на одном уклоне два значения плотности:

$$g\sin\alpha\{\rho_o+(\rho_T-\rho_o)C\}y=gtg\varphi\cos\alpha(\rho_T-\rho_s)(C-Cp)y\,, \quad (7.20)$$

$$\rho_s=\frac{\rho_o(1-C)+\rho_T Cp}{1-C+Cp}\,, \quad (7.21)$$

где ρ_s – плотность суспензии, кг/м^3; p – часть грунта, образующая суспензию.

$$tg\alpha=\frac{(C-Cp)(\rho_T-\rho_s)tg\varphi}{\rho_{см}}, \quad (7.22)$$

где $\rho_{см}$ – плотность селевой массы, кг/м^3.

$$\rho_{см}=\rho_T C+\rho_o(1-C)\,. \quad (7.23)$$

Энергетический подход к определению транспортирующей способности потоков использовали W. Rubey [197], а более позже R. Knapp [198], М. А. Великанов [111] и Р. Багнольд [199], рассматривавшие взвесенесущий поток как транспортирующий механизм.

Для определения зависимости между максимальной плотностью потока (объемной концентрацией твердых частиц, перемещаемых во взвешенном состоянии) М. А. Великанов предложил уравнение, в котором мощность, необходимая для поддержания частиц твердого компонента во взвешенном состоянии в единичном объеме, приравнивалась мощности, которой обладал поток (с учетом коэффициента полезного действия)

$$e_s\rho_{см}gV\sin\theta=g(\rho_T-\rho_o)\omega C(1-C)\,, \quad (7.24)$$

где V – скорость потока, м/с; ρ_o – плотность воды, кг/м^3; e_s – коэффициент полезного действия; ω – скорость падения частиц, м/с.

Мощность, развиваемая потоком, затрачивается преимущественно на нагревание селевой массы в процессе молекулярного и атомарного трения, соударение частиц твердого компонента, истирание и дробление твердых частиц в составе селевой массы и пород, вмещающих русло, генерацию звуковых и сейсмических волн, перенос частиц во взвешенном и влекомом состояниях и т.д. В связи с этим теоретическое решение задачи определения коэффициента полезного действия потока e_s как взвесенесущего механизма далеко от завершения, и наиболее приемлемой считается его оценка по данным об условиях формирования, движения и остановки селей, а также частичного распада селевой массы.

При больших концентрациях твердого компонента вязкость селевой массы достигает значения, при котором по формальному признаку (число Рейнольдса) режим течения может характеризоваться как ламинарный. Известно, что теоретически ламинарный режим течения исключает возможность

перемешивания селевой массы и, следовательно, в отсутствии у нее пластичности неизбежен распад селевой массы и затухание селевого процесса. Однако в природных условиях это может и не происходить. Затухание турбулентного перемешивания, обусловленного (по классическим представлениям) суперпозицией различных по размерам вихрей, может компенсироваться перемешиванием, вызываемым так называемыми вторичными течениями. Вторичные течения образуются в результате взаимодействия потоков с руслами, имеющими различные формы и размеры, и являющегося отличительным признаком естественных потоков от изучаемых в технической гидравлике схематизированных призматических потоков. Наличие у русел изгибов приводит к формированию устойчивой поперечной циркуляции, а перегибов – к образованию перекатов, скоростное поле которых имеет сравнительно беспорядочный характер, «… в самом общем виде вторичные течения могут быть или поступательными, направленными круто или полого к главному течению, или вращательными с горизонтальной или вертикальной осью, могут также представлять собой застойные местные вращения, а могут, вращаясь, перемещаться вниз по течению» [200]. Часть энергии таких «квазиламинарных» потоков может использоваться для поддержания частиц горных пород во взвешенном состоянии.

Наблюдения за мощными грязекаменными потоками показали, что при их движении по руслам, имеющим изгибы и перегибы, в результате деформации потоков и действия инерционных сил объемы порового пространства между крупными фракциями твердого компонента непрерывно изменяются. Это приводит к «перекачиванию» среды, занимающей поровое пространство, из одного объема в другой, сопровождающееся перемешиванием упомянутой среды. Подтверждением сказанному является вылет из потока обломков горных пород на единицы и даже десятки метров при прохождении селя 1973 г. в бассейне р. Киши Алматы и искусственно создававшихся селей в 1972–1980 гг. в бассейне р. Шамалган.

При турбулентном режиме потока и C<0,42 (по М. А. Великанову)

$$\sin\alpha = \left\{ \frac{(\rho_T - \rho_o)\omega C(1-C)}{e_s\left[\rho_T C + \rho_o(1-C)\right]kH^{0,5}} \right\}^{0,67}, \qquad (7.25)$$

где k –коэффициент Шези в формуле скорости потока; H – глубина потока, м.

Для ситуаций, когда твердый компонент представлен полидисперсными частицами [200],

$$\sin\alpha = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{n}(\rho_T - \rho_o)\omega_i C_i(1-C_i)}{e_s\left[\rho_T C + \rho_o(1-C)\right]kH^{0.5}} \right\}^{0,67}. \qquad (7.26)$$

Результаты экспериментальных исследований, выполненных во второй половине XX века, свидетельствуют об ошибочности существовавших

ранее представлений о характере влияния концентрации твердого компонента суспензий на их вязкость даже при монодисперсном составе твердого компонента [99]. По Т. С. Чонгу, при 50 % объемной концентрации твердых частиц в суспензии вязкость увеличивается в 12,2 раза по сравнению с вязкостью жидкого компонента, т.е. вязкость суспензии, образованной смешением воды (температура 5 °С) с твердыми частицами (С=50 %), будет равна 0,018 (Н·с)/м^2. Вязкость такой смеси в 390 раз меньше (при той же температуре) вязкости глицерина, а число Рейнольдса для потока глубиной 1 м и текущего на уклоне 0,05 (около 3°), близко к $5 \cdot 10^5$. При таких числах Рейнольдса режим течения носит турбулентный характер, обеспечивающий перемешивание массы потока и, следовательно, ограничение области применимости гравитационной теории, наложенное ее автором (М. А. Великановым), не правомерно.

Ошибочные представления о характере зависимости гидравлической крупности частиц от степени стесненности падения частиц, недоучет того обстоятельства, что относительно крупные частицы находятся не в воде, а в «тяжелой» жидкости, представленной смесью воды и относительно мелкими частицами, недооценка роли вязкопластических свойств селевых масс при определении гидравлической крупности частиц и влияния полидисперсности селеформирующих пород на вязкопластические свойства селевых масс и их предельно возможную плотность стали причиной того, что большинство исследователей в XX веке плотные селевые потоки относили к связным (структурным) потокам, их движение «… уже выходит за пределы тех движений, которые изучают в гидродинамике. Здесь мы наблюдаем как бы переход к «оплывине», в которой твердые составные части передают количество движения друг другу непосредственно …» [48].

Р. Багнольдом в 1966 г. разработана модель транспорта взвешенных наносов селем [201]. Твердый сток i_s, переносимый 1 м^3 воды, определяется по формуле

$$i = \rho_o g H S \left(\frac{e_s V^2}{\omega} \right), \tag{7.27}$$

где S – угол наклона русла, град; V – скорость движения потока, м/с; ω – гидравлическая крупность частиц, м/с; e_s – коэффициент полезного действия потока как взвесенесущего механизма, равный 0,01; если размер частиц менее 0,3 мм, e_s=0,06.

Если размер частиц полидисперсный, гидравлическая крупность определяется по формуле

$$\omega = \frac{\sum (p_i \omega_{cp\,i})}{\sum p_i}, \tag{7.28}$$

где p_i – доля частиц в гранулометрическом составе селеформирующих пород; ω_{cpi} – средняя гидравлическая крупность i-й фракции, м/с.

Б. С. Степановым и Т. С. Степановой [4], Б. С. Степановым [202] рассмотрены ситуации, когда все частицы или их часть перемещаются в режиме

стесненного падения. Если частицы имеют одинаковые размеры, падают в турбулентном режиме и режим течения потока турбулентный, то

$$\sin\alpha = \left\{ \frac{(\rho_T - \rho_o)\omega C(1-C)^j}{e_s\left[\rho_T C + \rho_o(1-C)\right]kH^{0,5}} \right\}^{0,67}, \qquad (7.29)$$

где $\omega(1-C)^j$ – скорость стесненного падения частиц [180], м/с; k – коэффициент Шези; j=2,4.

По данным [180], скорость стесненного падения частиц

$$\omega_{cm} = \omega(1-C)^j,$$

где

$$j = 4{,}65 + \frac{d}{D} \quad \text{для} \quad \mathrm{Re} = \frac{\omega d}{\eta} < 0{,}2,$$

$$j = (4{,}45 + 17{,}5\frac{d}{D})\,\mathrm{Re}^{-0{,}03} \quad \text{для} \quad 0{,}2 < \mathrm{Re} < 1,$$

$$j = (4{,}45 + 18\frac{d}{D})\,\mathrm{Re}^{-0{,}1} \quad \text{для} \quad 1 < \mathrm{Re} < 200,$$

$$j = 4{,}45\,\mathrm{Re}^{-0{,}1} \quad \text{для} \quad 200 < \mathrm{Re} < 500,$$

$$j = 2{,}39 \quad \text{для} \quad 500 < \mathrm{Re},$$

где d – диаметр шара; D – диаметр сосуда, в котором осуществляется стесненное падение частиц.

Если состав частиц, переносимых во взвешенном состоянии, полидисперсный и их падение происходит в турбулентном режиме, то

$$\sin\alpha = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{n}(\rho_T - \rho_{s(i-1)})\omega_i C_i (1-C_i)^j}{e_s\left[\rho_T C + \rho_o(1-C)\right]kH^{0,5}} \right\}^{0,67}, \qquad (7.30)$$

где $\rho_{s(i-1)}$ – плотность суспензии, включающей воду и все фракции, меньше i, кг/м^3; ω_{cpi} – средняя гидравлическая крупность частиц i-го интервала полного гранулометрического состава твердого компонента селевой массы, м/с.

Гидравлическая крупность i-й фракции

$$\omega_i = 1{,}22\sqrt{\frac{(\rho_T - \rho_{s(i-1)})gd}{\rho_{s(i-1)}}}, \qquad (7.31)$$

где d – размер частиц i-й и более фракций, м.

Если селевая масса обладает динамической вязкостью $\eta_{см}$, определяющей скорость течения потока, уравнение (7.30) принимает вид

$$\sin\alpha = \left\{ \frac{3\eta_{см}\left[\sum_{i=1}^{n}(\rho_T - \rho_{s(i-1)})\omega_i C_i (1-C_i)^j\right]}{e_s\left[\rho_T C + \rho_o (1-C)\right]^2 gH^2} \right\}^{0,5} . \qquad (7.32)$$

Практически идеальные условия для верификации моделей, описывающих зависимость плотности (концентрации твердого компонента) селевой массы от уклона русла, сложились при прорыве накопителя сточных вод г. Алматы, располагавшегося в пустыне Жаманкум, 28–29 января 1988 г. [48]. Накопитель сточных вод г. Алматы, предназначенный для аварийного сброса воды, прошедшей механическую и биологическую очистку, представлял собой естественную котловину в барханных песках Жаманкум. В результате сброса сточных вод в конце 1987 г. – начале 1988 г. проектная отметка предельно допустимого уровня заполнения накопителя была превышена на 0,86 м, образовавшийся водоем имел емкость, близкую к 36 млн м^3. К моменту прорыва водоема большая часть его была покрыта льдом, толщина которого в районе прорыва составляла 20–25 см.

28 января 1988 г. произошло разрушение озерной перемычки и вода потекла в направлении р. Каскелен (расположенной в 6,5 км) по поверхности массива эоловых песков, рельеф которого представлял собой бугры, образующие гряды, разделенные небольшими понижениями. К моменту прорыва относительное превышение поверхности воды в накопителе над р. Каскелен составляло около 87 м.

В начальной фазе опорожнения накопителя в перемычке образовался постепенно увеличивавшийся в ширину и глубину канал (с максимальной глубиной 6–7 м и длиной 1,5–2,5 км), вынесенный при этом песок образовал террасу площадью 0,25–0,6 км^2, расположенную на 6,5 м ниже уровня ледяного покрова накопителя. При дальнейшем движении водный поток, транспортировавший относительно небольшие объемы песка (вследствие малых уклонов пути движения по поверхности песчаного массива), заполнял понижения в барханном рельефе, образуя цепочку озер в направлении р. Каскелен. Последнее, наиболее крупное озеро, находилось на 23 м ниже уровня ледяного покрова накопителя Жаманкум. Средний уклон русла, образовавшегося между накопителем и последним крупным озером, был близок к 0,0038, и поэтому углубление русла в зоне перелива практически не происходило.

Мощные эрозионно-сдвиговые процессы на крутом склоне песчаного массива, примыкающего к пойме р. Каскелен, начались, когда по нему потекли воды паводка, образовавшегося в результате прорыва накопителя (к этому времени объем воды в накопителе уменьшился на несколько миллионов кубометров). Их следствием стало формирование каньона, отступавшего в глубь барханов со скоростью, превышавшей 10 см/с. Энергии рельефа и его градиента оказалось достаточно для формирования селевой массы с плотностью около 1900 кг/м^3. На это указывает стабильность рас-

хода воды (селевой массы) в р. Каскелен (увеличившегося с 10 до 60 $м^3$/с 28 января 1988 г.) до 3–4 ч 29 января [48, 49].

К этому времени в результате пятящейся эрозии каньон подошел к перемычке накопителя и началось ее интенсивное разрушение. Разрушение перемычки привело к многократному увеличению (до 1000 $м^3$/с) расхода водного потока и резкой активизации селевого процесса. Расход селя при слиянии с р. Каскелен составил 1500–2500 $м^3$/с. В результате селевого процесса в песчаном массиве образовался врез длиной около 10,6 км, шириной (по верхним кромкам) от 110 до 240 м и глубиной 51–53 м. Уклон дна врезa на участке перемычка накопителя – пойма р. Каскелен был близок к 0,007 (рисунок 7.10).

Рисунок 7.10. Каньон, образовавшийся
в результате формирования селя 28–29 января 1988 г.

В ходе заполнения (первая фаза прорыва накопителя) понижений на поверхности песчаного массива и образования озер формировались небольшие водные потоки, которые отходили от основной системы озер и водотоков, определивших в конечном счете траекторию образования главного вреза. Некоторые из упомянутых потоков (существовавших до тех пор, пока образование главного вреза не лишало их питания), образуя систему боковых врезов, вновь соединялись с основным потоком. Строение боковых врезов (V-образная форма, постепенное увеличение глубины и ширины на протяжении первых сотен метров), строение основного вреза (пологое, шириной порой более 100 м, дно вреза на протяжении 6,5 км, плавное увеличение уклона дна накопителя по мере удаления от створа, в котором начался перелив воды, закономерности, определяющие зависимость плотности селевой массы от расхода и глубины потока, уклона пути движения и т.д.) позволяют утверждать, что продольный профиль пути движения селя состоял из трех основных участков:

слабо наклоненный участок от створа перелива и почти до поймы р. Каскелен (около 6 км), длина этого участка уменьшалась по мере удаления вреза от поймы р. Каскелен;

участок формирования селевой массы, наклон которого составлял несколько градусов и имевший длину несколько сотен метров;

участок движения селевой массы от конца участка формирования селевой массы до поймы р. Каскелен, длина этого участка увеличивалась по мере удаления вреза от поймы р. Каскелен.

Участок от створа перелива и почти до поймы р. Каскелен (около 6 км) имел незначительный (0,0038) средний уклон. В такой ситуации водный поток был способен только «выравнивать» уклоны отдельных участков русла, формируемого прорывным паводком на поверхности песчаного массива.

Участок движения селевой массы от конца участка формирования селевой массы до поймы р. Каскелен должен был иметь уклон, обеспечивающий движение селевой массы без распада от створа перелива до поймы р. Каскелен. Фактический уклон, по данным тахеометрической съемки, составлял 0,007, а расчетное значение энергии рельефа, обеспечившей движение селевой массы без распада от створа перелива до поймы р. Каскелен, было близко к 42 м.

Таким образом, доля энергии рельефа, которая могла быть использована для образования селевой массы, была около 40 м (участок формирования селевой массы, наклон которого составлял несколько градусов и имевший длину первые сотни метров). Сравнение приведенных данных с результатами наблюдений за селеформированием на Шамалганском полигоне показало, что энергии рельефа (40 м) вполне достаточно [в условиях Жаманкума (таблица 7.1)] для формирования селя с плотностью селевой массы более 2000 кг/м^3, обеспечивающей движение без распада на уклоне 0,007 при глубине потока 2,5–3 м.

Таблица 7.1. Гранулометрический состав песков Жаманкум, %

Глубина отбора, м	Фракции, мм			
	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	<0,1
0–3	3,4	50,3	37,5	8,8
3–6	1,2	32,0	56,1	10,7
6–9	2,2	36,3	55,2	6,3
9–12	1,1	22,2	59,8	16,9
12–20	4,2	34,3	49,6	11,9
20–50	1,8	30,0	54,9	13,3
Среднее по шести горизонтам	2,3	34,2	52,2	11,3

Содержание пылевато-глинистых фракций в гранулометрическом составе грунтов пустыни Жаманкум незначительно. Селевая масса даже при плотности, близкой к 2000 кг/м^3, свойством пластичности практически не обладает.

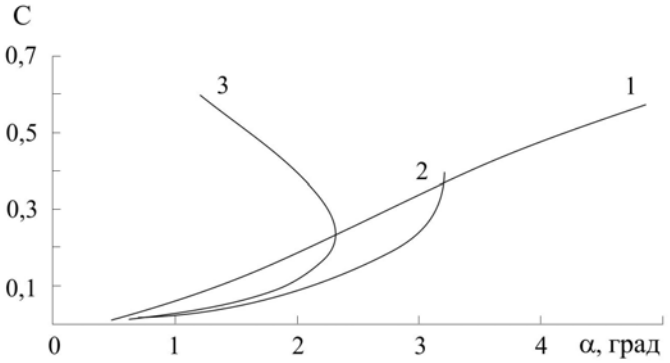


Рисунок 7.11. Кривые зависимости объемной концентрации твердого компонента в потоке от уклона русла, рассчитанные по формулам:
1 – Р. Багнольда; *2* – М. А. Великанова; *3* – формуле (7.29)

На рисунке 7.11 приведены зависимости концентрации твердого компонента в селевой массе от уклона русла, рассчитанные по формулам (7.25), (7.27) и (7.29) для одних и тех же характеристик: потока (глубина потока, коэффициент полезного действия потока как взвесенесущего механизма); морфометрии русла (угол наклона, шероховатость); гидравлической крупности частиц, переносимых во взвешенном состоянии; жидкий компонент селевой массы – вода.

Сплошной линией показана кривая, полученная по формуле (7.27). Кривая однозначная, монотонная, на относительно малых уклонах значения концентрации превышают таковые, получаемые при вычислении по формулам (7.25) и (7.29).

Штрихами изображена кривая – результат решения уравнения, получаемого из условия равенства мощности потока (с учетом коэффициента полезного действия), рассматривавшегося М. А. Великановым как взвесенесущий механизм, мощности, необходимой для поддержания частиц твердого компонента во взвешенном состоянии (при принятии гипотезы М. А. Великанова, в соответствии с которой «… 50 % концентрация определяется как возможный теоретический предел, при котором турбулентный поток в состоянии перемешивания жидких масс, … практически предел лежит несколько ниже, по-видимому, около 0,4–0,42») [48].

Нетрудно видеть, что приведенная зависимость однозначна: относительно плотный поток, образовавшийся на определенном уклоне, оказавшись на относительно меньшем уклоне, должен трансформироваться (из-за недостатка энергии) таким образом, чтобы его плотность уменьшилась в соответствии с уменьшением уклона.

Пунктиром изображены результаты расчета по формуле (7.29), ограничения по концентрации наложены из соображений, позволяющих утверждать (опираясь на современные данные о зависимости вязкости суспензий, представленных смесью воды и твердых частиц, размеры которых превышают сотые доли миллиметра), что режим движения потоков турбулентный, обеспечивающий перемешивание за счет вихреобразования.

Важнейшей характеристикой кривой, построенной по результатам расчетов по формуле (7.29), является неоднозначная зависимость концентрации твердого компонента селевой массы от уклона русла, что коренным образом изменило существовавшие ранее представления о селевых процессах.

Масса песка, вынесенная в соответствии с формулой (7.27),

$$M_п = i_s W_в = 313 \text{ кг/м}^3 \cdot 36 \cdot 10^6 \text{ м}^3 = 11270 \cdot 10^6 \text{ кг},$$

где i_s – масса наносов, переносимая 1 м^3 воды; $W_в$ – объем воды.

При плотности наносов 2650 кг/м^3 их объем равен $4{,}25 \cdot 10^6$ м^3, что почти на порядок меньше объема каньона, образовавшегося в результате прорыва накопителя сточных вод.

Потенциальные возможности выноса наносов, определяемые уравнением (7.29), составляют

$$M_п = \frac{\rho_T C W_в}{(1-C)\rho_T} = \frac{2650 \text{ кг/м}^3 \cdot 0{,}8 \cdot 36 \cdot 10^6 \text{ м}^3}{(1-0{,}8) \cdot 2650 \text{ кг/м}^3} = 144 \cdot 10^6 \text{ м}^3,$$

что примерно в 3 раза превышает объем каньона.

Следует, однако, иметь в виду, что до того, как произошло стремительное разрушение перемычки, в результате чего сформировался сель с расходом 1500–2500 м^3/с, в течение суток происходило постепенное опорожнение накопителя с расходом до 60 м^3/с, приводившее к уменьшению объема воды.

Приведенные данные свидетельствуют о хорошем соответствии модели (7.29), описывающей зависимость плотности селевой массы от уклона русла при гранулометрическом составе, представленном однородными по размеру частицами твердого компонента, в реально наблюдавшейся ситуации.

Примером формирования селя в результате взаимодействия сосредоточенного водного потока с породами древних морен, имеющих полидисперсный гранулометрический состав, могут служить события, произошедшие в бассейне р. Киши Алматы, расположенном на северном склоне Иле Алатау.

15 июля 1973 г. в результате разрушения перемычки, разделявшей озера №2 и 3 на леднике Туйыксу, и образования мощного паводка, максимальный расход которого оценивался в 300 м^3/с, образовался катастрофический сель, максимальный его расход достигал 10 тыс. м^3/с, плотность селевой массы была близка к 2390 кг/м^3, а объем – 3,8 млн м^3. Формирование селя происходило в селевом врезе длиной 8 км, продольный наклон которого изменялся от 8 до 14°. Русло углубилось на 12–15 м (местами до 40 м). Сель отложился в селехранилище, образованном плотиной в урочище Медеу [8].

Этот сель образовался в результате взаимодействия водного потока с рыхлообломочными породами, подобно тому, что наблюдалось во время проведения экспериментов по искусственному воспроизведению селей на Шамалганском полигоне в 1972, 1973, 1975, 1976 и 1978 гг. Было установлено, что турбулентное перемешивание в совокупности с перемешиванием,

обусловленным поперечными циркуляциями в потоке, сохраняется до концентрации твердого компонента в селевой массе, намного превышающей значения в существовавших ранее представлениях. Это коренным образом изменило мнение о механизмах образования селевой массы большой плотности. Гранулометрический состав селеобразующих пород существенно отличается от пород пустыни Жаманкум. Пылевато-глинистых фракций в древних моренных отложениях достаточно для того, чтобы при плотности селевой массы около 2400 кг/м^3 она обретала свойство пластичности, достаточное для поддержания в квазивзвешенном состоянии практически всех фракций твердого компонента селевой массы.

Таблица 7.2. Гранулометрический состав морен бассейна р. Киши Алматы (Иле Алатау, Северный Тянь-Шань)

Размер фракций, мм	0-0,1	0,1-1	1-10	10-100	100-1000	1000-10000
Содержание частиц грунта, %	4	7	19	30	36	4

На рисунке 7.12 приведена кривая состояния селевой массы, рассчитанная с использованием гранулометрического состава пород бассейна р. Киши Алматы при глубине селевого потока 2 м. Отрезок *OAB* построен с использованием формулы (7.30), а *BC* – по данным о предельном напряжении сдвига селевой массы, полученным в результате анализа следов прохождения селя 1921 г. по территории г. Верного (Алма-Ата, Алматы), и данным о величинах предельного напряжения сдвига селевых масс, типичных для селей северного склона Иле Алатау.

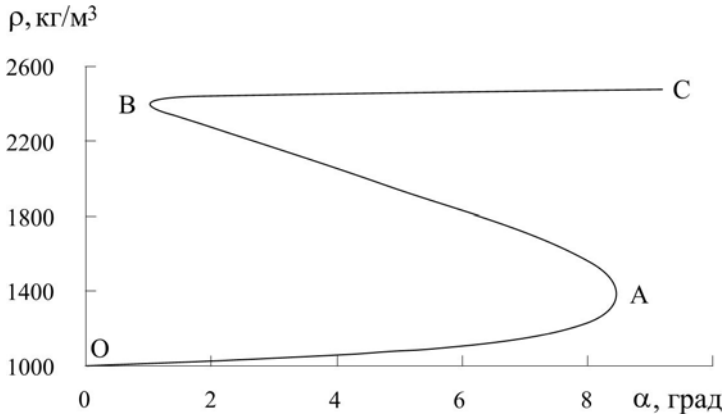


Рисунок 7.12. Кривая состояния селевой массы. Гранулометрический состав селеформирующих пород бассейна р. Киши Алматы, глубина селевого потока 2 м, коэффициент полезного действия потока (как взвесенесущего механизма) 0,07

Кривая хорошо отражает основные закономерности селевых процессов, протекающих в описанных условиях: плотные сели не формируются на малых уклонах; абсцисса, соответствующая преобладанию положительных обратных связей над отрицательными, близка к 9° [валуны и глыбы могут

самостоятельно, находясь в воде (суспензии), перемещаться со средней скоростью потока]. Не безынтересен и тот факт, что максимальный угол наклона селевого очага, в котором образовался катастрофический сель после прорыва моренного озера в бассейне р. Сарыкан (Жетысу Алатау) в 1988 г., был близок к 11°, а максимальные размеры глыб приближались к 10 м. При плотности, превышающей 2400 кг/м^3, селевая масса может перемещаться без остановки и распада на относительно малых уклонах (первые единицы градуса) за счет потенциальной энергии селевой массы.

Это становится возможным, когда частицы твердого компонента, не образуя твердый скелет (опирающийся на дно русла, сопротивление движению при этом носит кулоновскую природу), перемещаются во взвешенном состоянии, обусловленном перемешиванием селевой массы, либо в квазивзвешенном состоянии благодаря пластичности селевой массы.

При прохождении Жарсайских селей в 1958 и 1963 гг. (плотность селевой массы превышала 2350 кг/м^3) на участке длиной 1645 м со средним уклоном 5,5° было вынесено 550 тыс. м^3 рыхлообломочных пород. При этом русло углубилось в среднем на 6 м, а его ширина возросла с 24 до 40 м [203].

На кривой равновесных состояний, имеющей участок с отрицательным наклоном (рисунок 7.13), ветви *1* и *2* представляют собой аттракторы – совокупность точек устойчивого равновесия и совпадают с Ξ-функцией. Ветвь *3* – геометрическое место точек, обозначающих неустойчивое равновесие селевой массы.

Таким образом, Z-функция делит плоскость (ρ, α) на область распада и область набора, что позволяет прогнозировать эволюцию селевого потока.

Результаты вычислений по описанной модели хорошо согласуются с данными наблюдений за прохождением селей в различных физико-географических зонах и позволяют осуществлять количественную интерпретацию тех особенностей селевых процессов, которые не находили даже качественного объяснения в рамках общепринятых представлений о селевых явлениях.

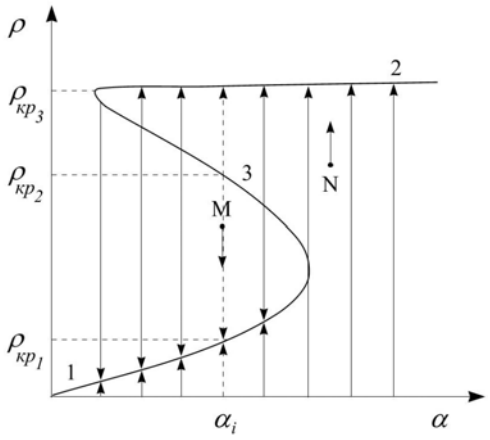


Рисунок 7.13. Кривая равновесных состояний в одномерном пространстве

7.4. Экспериментальное определение параметров функции равновесных состояний

Поскольку возможность теоретического описания кинематики формирования селевой массы в результате взаимодействия водного потока с рыхлообломочными породами в обозримом будущем представляется проблематичной, данные о предельных условиях существования селевой массы, необходимые для дальнейшего развития теории формирования селевой массы и решения практических задач противоселевой защиты, могут быть получены экспериментальным путем [204].

Идеальной установкой, позволяющей решать задачи по выявлению зависимости между плотностью селевой массы и минимальным уклоном русла, на котором не происходит ее распад, является лоток. Он должен иметь регулируемый наклон, а геометрические размеры (длина, ширина) и шероховатость дна должны соответствовать характеристикам естественных участков селевых очагов (русел). Это устройство должно быть укомплектовано смесителем.

Однако создание и эксплуатация такого измерительного комплекса требуют значительных затрат. Действительно, достаточно представить себе сложность конструкции узла формирования селевой массы с расходом 20–50 $м^3/с$. В связи с этим возникает идея замены наклонного лотка кольцевым (в вертикальной плоскости) лотком. В кольцевом лотке путем изменения скорости его вращения селевая масса может быть перемещена на участок лотка, при движении на котором свободная поверхность модели потока будет иметь наперед заданный уклон. В такой установке зависимость между плотностью потока и минимальным уклоном, при котором не происходит распад селевой массы, можно получить следующим образом. Лоток загружается твердым и жидким компонентами в определенных пропорциях. Полного их перемешивания добиваются, регулируя скорость вращения лотка. В ходе постепенного уменьшения скорости вращения измеряется плотность массы и, как только ее плотность начнет уменьшаться, определяется уклон свободной поверхности модели потока.

При бесконечно большом радиусе лотка наблюдатель, перемещающийся вместе с лотком, не смог бы найти признаки, позволяющие отличить данные эксперимента от таковых, проводимых с помощью неподвижного наклонного лотка. В обоих экспериментах уклоны свободной поверхности потоков и скорости их движения относительно лотков будут одинаковыми (влиянием воздушной среды на характеристики потока мы пренебрегаем).

Так как изготовление лотка с бесконечным радиусом нереально, рассмотрим возможность использования кругового лотка с конечным радиусом. В таком лотке длина «потока» конечна, а глубина существенно различна по длине. Поверхностный слой потока твердым компонентом в таких условиях обогащается не только вследствие перемешивания, характерного для турбулентного движения потока, но и за счет вертикальной составляющей траектории частиц, перемещающихся в придонной области. В то же время следует отметить, что классическому взвешиванию частиц

препятствуют силы инерции, проявляющиеся при криволинейном движении частиц. В описываемой ситуации существует и нисходящий поток, который в определенной мере компенсирует взвешивание твердого компонента восходящей ветвью модели потока.

Таким образом, на результаты экспериментов с кольцевым лотком конечного радиуса будет оказывать влияние дополнительный механизм взвешивания твердого компонента, но при выявлении качественной стороны явлений им можно пренебречь.

Вертикальный лоток, спроектированный и изготовленный в КазНИГМИ, имеет следующие характеристики: диаметр – 1350 мм, ширина – 1000 мм. Внутренняя поверхность лотка снабжена шероховатостями (стальными полосами высотой 60–70 мм и длиной 800 мм, наклоненными под углом 45° к касательной в точке соприкосновения с внутренней поверхностью лотка). Для возврата обломков, захваченных элементами шероховатости, внутри лотка по всей его ширине установлена наклонная плоскость.

Лоток загружался двухкомпонентной смесью до уровня h=370 мм, затем приводился во вращение вокруг горизонтальной оси с угловой скоростью, обеспечивающей равномерное распределение твердого компонента в теле потока. Плотность массы потока определялась путем отбора пробы объемом 9 дм^3 в поверхностном слое (толщиной 100–150 мм), в его центральной части. Затем скорость вращения постепенно снижалась до тех пор, пока плотность смеси не начинала уменьшаться вследствие превышения скорости распада смеси над скоростью взвешивания твердого компонента. В этот момент определялись угловая скорость вращения лотка, уклон свободной поверхности смеси, поверхностная скорость ее движения и плотность селевой массы. Рассчитывался также уклон свободной поверхности селевой массы в лотке при его остановке.

К сожалению, при большой плотности смеси из-за несовершенства электрического привода лотка не удалось получить минимальные углы наклона свободной поверхности потока, при которых еще не происходит распад селевой массы. В первом приближении за минимальные углы наклона можно принять таковые, соответствующие остановке селевой массы. По той же причине не удалось получить значения критических углов $\alpha_{кр}$, соответствующих переходу от транспортного к эрозионно-сдвиговому процессу.

На рисунке 7.14 приведены результаты экспериментов по выявлению зависимости между плотностью селевой массы и минимальным уклоном, на котором не происходит ее распад, выполненных на круговом лотке КазНИГМИ. Зависимость получена для селевой массы, гранулометрический состав твердого компонента которой близок к усеченному составу рыхлообломочных пород Иле Алатау.

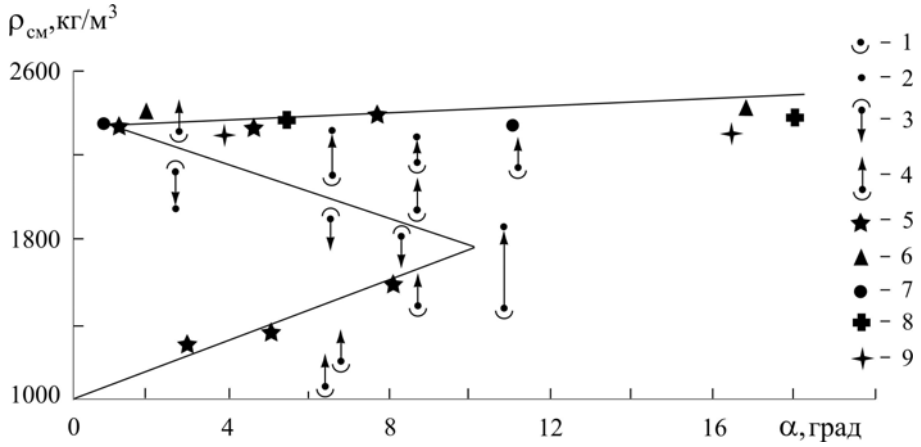


Рисунок 7.14. Результаты экспериментальных исследований кривых равновесных состояний: *1* – начальное значение плотности; *2* – конечное значение плотности; *3* – распад селевой массы; *4* – обогащение селевой массы; *5* – данные, полученные на круговом лотке. Данные наблюдений: *6* – сель 1921 г. (бассейн р. Киши Алматы); *7* – сель 1982 г. (бассейн р. Сарыкан); *8* – сель 1963 г. (бассейн р. Есик); *9* – искусственный сель 1975 г. (Шамалганский экспериментальный полигон)

Во всем диапазоне плотностей селевой массы течение носило турбулентный и квазиламинарный характер, движения с ядром не наблюдалось. Абсолютное значение поверхностной скорости движения селевой массы было близко к линейной скорости движения лотка.

С целью оценки влияния конечных размеров кругового лотка на результаты экспериментального определения характеристик *Z*-функций в КазНИГМИ была разработана и изготовлена установка, состоящая из четырех бункеров и лотка сечением 0,5×0,5 м и длиной до 30 м. В бункеры загружалась селевая масса с заранее заданной плотностью (если скорость распада ее была невелика) или часть из них загружалась плотной массой, а другая – раствором суспензии малой плотности. Компоненты в заданных пропорциях соединялись на специальном участке лотка, снабженном отражателями, с помощью которых компоненты смешивались.

Дно лотка было покрыто слоем бетона, шероховатость создавалась путем внедрения в бетон щебня таким образом, чтобы высота выступов составляла 0,04–0,05 м. Средняя глубина потоков в лотке колебалась от 0,15 до 0,25 м, т.е. была соизмерима с высотой выступов шероховатости.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. На вход 10-метрового лотка (уклон которого в процессе опытов изменялся) подавалась двухкомпонентная смесь. При движении потока по лотку (на дно которого предварительно укладываются рыхлообломочные породы) в зависимости от плотности исходной смеси и уклона лотка селевая масса обогащалась твердым компонентом либо происходил ее частичный распад, сопровождавшийся выпадением наиболее крупных фракций. Начальные и конечные значения плотности селевой массы определялись путем отбора

проб. Полученные данные хорошо согласовались с таковыми, полученными на круговом лотке. Имевшиеся отличия были обусловлены особенностями взвешивания твердого компонента в круговом лотке.

Наличие отрицательного наклона у *Z*-функций позволило теоретически обосновать не известное ранее природное явление – скачкообразное увеличение плотности селевой массы при превышении уклоном русла критического значения для заданных характеристик русла и потока, а также гранулометрического и минералогического составов твердого компонента селевой массы [195].

На рисунке 7.15 приведены кривые так называемых *Ξ*-функций, отражающих зависимость максимально возможных значений плотности селевой массы (при заданных значениях глубины потока и реологических характеристик селевой массы) от уклона русла. Из рисунка 7.15 следует, что при превышении (на бесконечно малую величину) уклонами русла значений, соответствующих уклонам, при которых *Z*-функции обретают отрицательный наклон, плотность увеличивается на конечную величину (функция претерпевает разрыв).

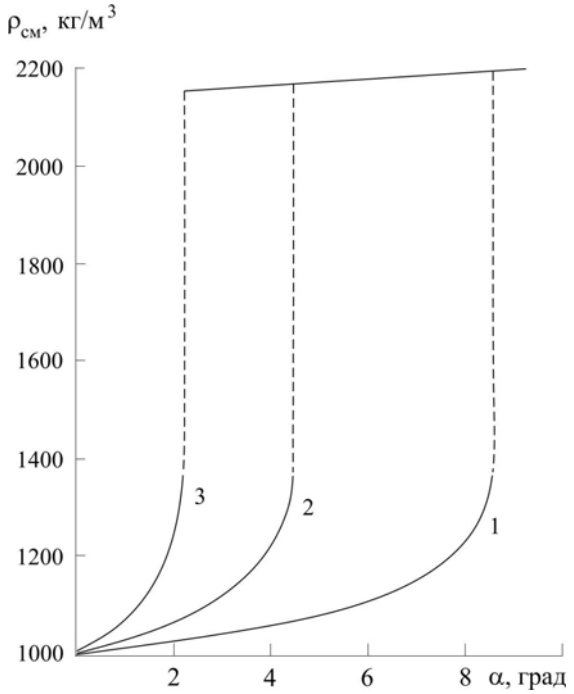


Рисунок 7.15. Явление скачкообразного изменения плотности селевой массы при превышении уклоном критических значений при различных глубинах потоков: *1* – 0,5 м; *2* – 1 м; *3* – 2 м

С физической точки зрения это означает, что при бесконечно малом (относительно угла $\alpha_{кр}$) росте угла наклона русла поток приобретает энергетическую возможность (за конечное время на конечной длине русла) увеличения плотности селевой массы на конечную величину. На примерах,

приведенных на рисунке 7.15: если на углах $\alpha_{кр}$ плотность селевой массы была равна 1350–1370 кг/м^3, то при повышении угла наклона на бесконечно малую величину плотность станет (через какое-то конечное время, при наличии рыхлообломочных пород в русле, после продвижения селя на какую-то длину) близкой к предельно возможной (для гранулометрического состава Жаманкумских песков) – 2200 кг/м^3.

Характер изменения *Z*-функций, показанных на рисунке 7.16, *г*, *д*, *е*, становится понятным при сопоставлении с графиками, иллюстрирующими зависимость мощности, необходимой для взвешивания твердого компонента селевой массы, и мощности, которой располагает поток на взвешивание частиц, от плотности селевой массы (концентрации твердого компонента в селевой массе) при различных глубинах потоков и уклонах русел (рисунок 7.16, *а*, *б*, *в* $H_1<H_2<H_3$; $\alpha_1<\alpha_2<\alpha_3<\alpha_4$ …). Гранулометрический состав селеформирующих пород выбран таким, чтобы частицы в потоке перемещались во взвешенном состоянии даже при минимальных глубинах потоков и уклонах русел.

На рисунке 7.16, *а* представлена ситуация, типичная для малых глубин потоков (доли, первые единицы сантиметров). Уже небольшое увеличение концентрации частиц в селевой массе приводит к затуханию турбулентного перемешивания в толще потоков, поэтому *Z*-функция однозначна. Плотность селевой массы находится в прямой зависимости от уклона русла (см. рисунок 7.16, *г*).

Из рисунка 7.16, *б* следует, что с увеличением глубины потоков выполаживание графиков зависимостей между мощностями, которыми располагает поток на взвешивание твердого компонента, и плотностями приводит к появлению точки перегиба у соответствующей *Z*-функции (см. рисунок 7.16, *д*). Однако *Z*-функция остается однозначной. Объясняется это тем, что увеличение плотности селевой массы сначала благоприятствует взвешиванию за счет уменьшения скорости группового (стесненного) падения частиц (увеличение вязкости селевой массы при этом практически не сказывается на характеристиках перемешивания в потоках), при дальнейшем повышении плотности транспортирующая способность потока уменьшается из-за затухания перемешивания, обусловленного возрастанием вязкости селевой массы.

Рисунок 7.16, *е* соответствует ситуации, когда глубина потока относительно велика. При этом турбулентное перемешивание сохраняется практически до предельно возможной (из соображений упаковки частиц) концентрации: *Z*-функция становится неоднозначной (см. рисунок 7.16, *е*). Именно такая ситуация характерна для селепроявлений, представляющих практический интерес.

При полидисперсном гранулометрическом составе твердого компонента селевой массы, включающем в себя частицы с размерами от долей микрона до нескольких метров, важную роль в существовании селей играют архимедова сила и свойство пластичности селевой массы, которая по отношению к крупным частицам может рассматриваться как дисперсионная среда. Полидисперсность частиц твердого компонента несколько

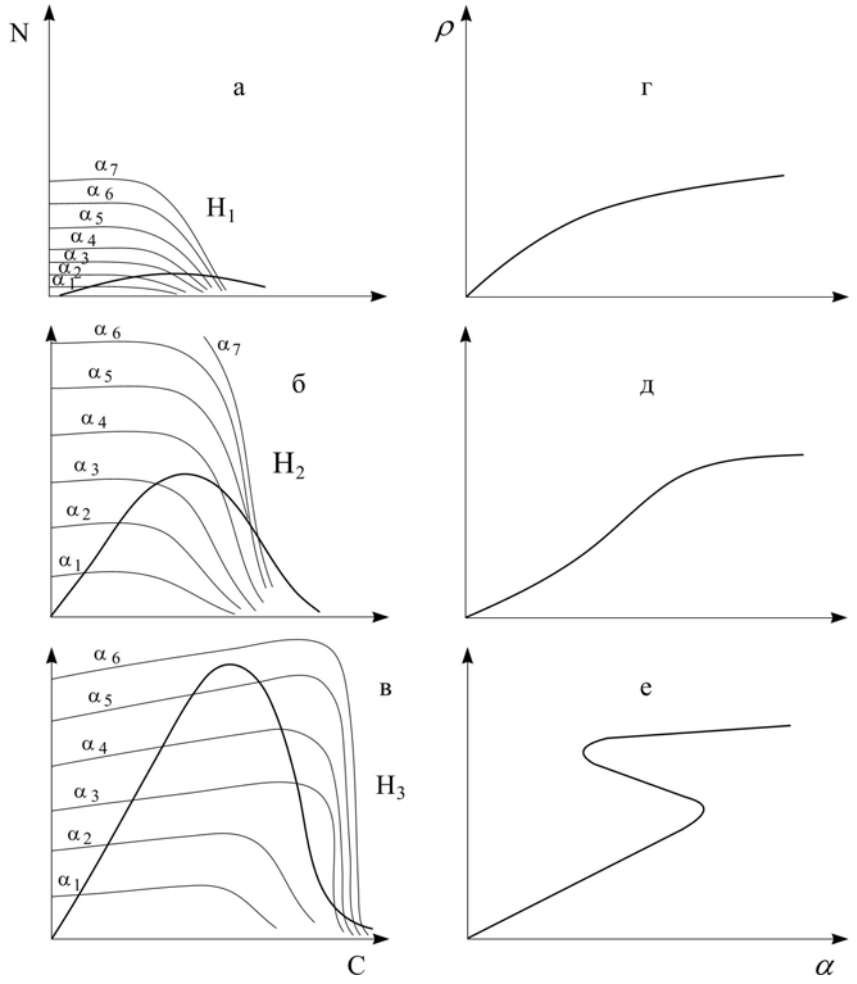


Рисунок 7.16. Зависимость мощности *N*, необходимой для поддержания твердого компонента селевой массы во взвешенном состоянии (жирные линии), и мощности, которой располагает поток на взвешивание (тонкие линии), от концентрации твердого компонента *C* (*а*, *б*, *в*) при $H_1<H_2<H_3$ и $\alpha_1<\alpha_2<\alpha_3<\alpha_4$ … и соответствующие им *Z*-функции (*г*, *д*, *е*)

осложняет расчет обсуждаемых зависимостей. В особой мере это относится к расчету мощности, необходимой для взвешивания частиц. Обобщенная блок-схема модели состояния селевой массы приведена на рисунке 7.17.

Подтверждение теоретических положений о закономерностях, обеспечивающих возможность существования неоднозначной зависимости плотности селевой массы от уклона пути движения селевого потока, его глубины и характеристик селевой массы экспериментальными данными, а также данными, полученными из наблюдений за процессами зарождения, развития и деградации селей в различных геолого-геоморфологических и гидрологических ситуациях, позволяет утверждать о существовании не

Рисунок 7.17. Обобщенная блок-схема модели состояния селевой массы

известного ранее явления скачкообразного изменения плотности селевой массы, заключающегося в том, что предельная концентрация рыхлообломочных пород в потоке скачкообразно увеличивается при значениях уклона русла и расхода потока, превышающих критические значения для заданных морфометрии русла, минералогического и гранулометрического составов твердого компонента селевой массы и ее плотности.

Теория существования селевой массы является ключевым элементом при прогнозе трансформации селевых процессов, поскольку позволяет определять направление эволюции селевого процесса (возможность увеличения или уменьшения плотности селевой массы при изменении морфометрических характеристик пути движения селя) по данным о текущих характеристиках селевого процесса (расход потока, плотность и реологические характеристики селевой массы, плотность и гранулометрический состав ее твердого компонента).

Глава 8

ТРАНСФОРМАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЕВЫХ ПОТОКОВ

8.1. Краткая ретроспектива

Характеристики селя и селевой массы могут существенно меняться за пределами селевого очага. Процесс взаимодействия селевой массы с породами, вмещающими селевое русло, способен приводить как к вовлечению в движение рыхлообломочную породу и содержащуюся в ней воду, так и к потере части селевой массы (твердого компонента) вследствие ее частичного распада или «размазывания». Ход селевого процесса определяется морфометрией пути движения селевого потока, его расходом и объемом, а также свойствами селевой массы.

Под трансформацией селя и селевой массы будем понимать изменение во времени и пространстве их характеристик: расхода, объема, скорости, плотности, вязкости, предельного напряжения сдвига, гранулометрического и минералогического составов и т.д. Изучение процесса трансформации позволяет ответить на вопрос о том, что произойдет с селевым потоком на пути его движения до расчетного створа, с какими параметрами он пересечет створ. Различие масштаба селевых процессов приводит к поэтапному перемещению твердого компонента: отложения относительно малых селей являются источником питания более крупных селей. Разгрузка долин (имеющих незначительные уклоны 2–5°) от накапливающихся в них рыхлообломочных пород, поставляемых паводками, обвалами, оползнями, лавинами и малыми по объему селями, осуществляется мощными селевыми потоками. При этом рыхлообломочные породы выносятся в предгорную зону, образуя конусы выноса.

Вовлечение в движение рыхлообломочных пород в процессе трансформации протекает по сценарию эрозионно-сдвигового процесса. Частичный распад селевой массы происходит при выходе селя в долину, имеющую относительно небольшой уклон, если селевая масса не обладает вязкопластическими свойствами, достаточными для поддержания всех фракций твердого компонента во взвешенном состоянии только за счет проявления этих свойств. Причиной могут служить малое содержание в селеформирующих породах пылевато-глинистых фракций, недостаточные длина и уклон селевого очага, смешение селевого потока с соизмеримыми по расходу водными потоками и т.д.

Таким образом, трансформация селя представляет собой органическое сочетание процессов обогащения потока рыхлообломочными породами (набора) и отложения селевой массы, сопровождающейся изменением их физико-механических свойств.

Несмотря на то, что со времени первых публикаций, посвященных вопросам теории существования селевой массы, прошло уже более 30 лет, *Z*-функция не нашла широкого применения при описании процесса трансформации селя. Большинство исследователей продолжает считать, что за пределами селевого очага, характеризующегося относительно большим уклоном, селевые процессы монотонно затухают при сохранении свойств селевой массы. Простейшие схемы трансформации характеристик селей приведены в работах [126, 158, 205–207].

В модели Ю. Б. Виноградова реализован принцип экспоненциального истощения расхода и объема селей. В соответствии с этой концепцией автор модели предполагал, что при $\alpha > \alpha_{кр}$ «... снижение расхода селевой массы на единицу пути движения потока прямо пропорционально самому расходу Q_c и ширине дна долины B и обратно пропорционально отношению разности напряжений движения F_v и торможения F_φ к давлению селевой массы на горизонтальную площадку F_g» [126].

Тогда максимальный расход и объем селевого потока в конце каждого k-го участка определяется по формулам:

$$\left[(Q_c)_{\max}\right]_k = \left[(Q_c)_{\max}\right]_{k-1} \exp\left[-c_2 \frac{B_k(l_k - l_{k-1})}{\cos\alpha(tg\alpha - tg\varphi)}\right], \tag{8.1}$$

$$W_k = W_{k-1} \exp\left[-c_2 \frac{B_k(l_k - l_{k-1})}{\cos\alpha(tg\alpha - tg\varphi)}\right], \tag{8.2}$$

где $\left[\left(Q_c\right)_{max}\right]_{k-1}$ – максимальный расход селевого потока в конце предшествующего участка, м^3/с; c_2 – коэффициент пропорциональности, изменяющийся от $1\cdot10^{-7}$ до $4\cdot10^{-7}$ м$^{-2}$; B_k – ширина дна долины на расчетном участке, м; l_k, l_{k-1} – верхняя и нижняя точки, ограничивающие расчетный участок по длине селевого русла, м; α – угол наклона расчетного участка селевого русла, град; φ – динамический угол внутреннего трения селевой массы, град; W_{k-1} – объем селевого потока в конце предшествующего участка, м^3.

Критический уклон определяется по формуле

$$tg\alpha_{кр} = \frac{tg\varphi_{дин}}{\dfrac{\rho_T}{\rho_T - \rho_0} + \dfrac{\rho_0}{\rho_T - \rho_0}\dfrac{\varepsilon}{1-\varepsilon}}, \tag{8.3}$$

где $\varphi_{дин}$ – динамический угол внутреннего трения водонасыщенной рыхлообломочной породы, град.

Результаты расчетов, выполненных с помощью описываемой модели, приведены на рисунке 8.1. Бросается в глаза сильная зависимость искомых величин от коэффициента пропорциональности c_2. Рекомендации по принятию коэффициента пропорциональности автором модели не приводятся. В той же мере это относится и к разности $tg\alpha – tg\varphi$.

Очевидным недостатком этой модели является независимость характера истощения характеристик селей от их исходных значений. Это положение

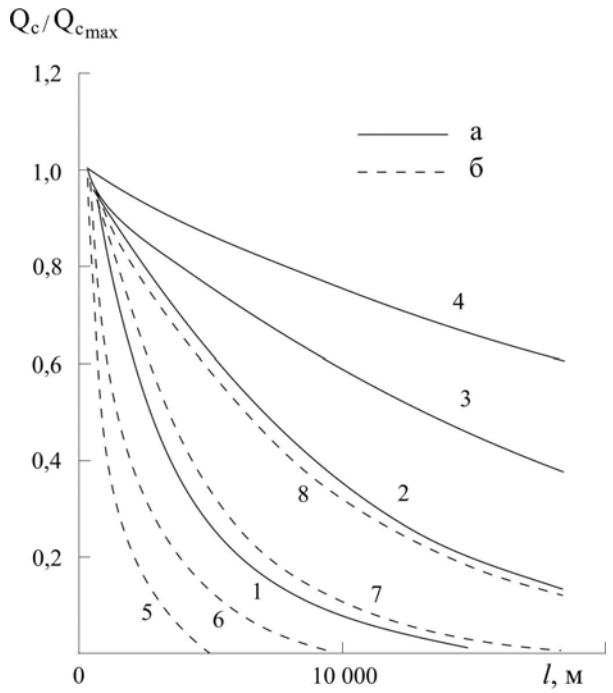


Рисунок 8.1. Характер трансформации селевого потока по Ю. Б. Виноградову.
а – (C=10^{-7}); *б* – (C=$4\cdot10^{-7}$); *1*, *5* – [(tgα–tgφ)=0,02];
2, *6* – [(tgα–tgφ)=0,05]; *3*, *7* – [(tgα–tgφ)=0,1]; *4*, *8* – [(tgα–tgφ)=0,2]

противоречит данным наблюдений за развитием селевых явлений в различных физико-географических условиях.

Представления Т. Такахаши [129] об условиях формирования и трансформации характеристик селей практически не отличаются от концепции Ю. Б. Виноградова. Критический уклон, разграничивающий процесс обогащения селевой массы твердым компонентом от процесса частичного распада селевой массы, определяется из выражения

$$tg\alpha_{кр} = \frac{(\rho_T - \rho_o) Ctg\varphi_{дин}}{(\rho_T - \rho_o) C + \rho_o}. \qquad (8.4)$$

В. И. Тевзадзе разработал модель трансформации характеристик селей в ситуациях, когда селевая масса обладает ярко выраженными вязкопластическими свойствами [205]. Трансформация связного селевого потока «... сводится к следующим основным фазам: “начало движения”, “движение по руслу” от верховьев до конуса выноса в транзитной зоне и “остановка на конусе выноса”».

Основным параметром, определяющим условие предельного равновесия селевой массы, В. И. Тевзадзе считает предельное напряжение сдвига τ_0. В работе [205] он предлагает, вслед за П. П. Мосоловым и В. П. Мясниковым [208], для описания предельного равновесия использовать методы вариационного исчисления. Этот подход, считает В. И. Тевзадзе, позволяет определить границы застойных зон при заданном градиенте давления и

известном предельном напряжении сдвига τ_0. И наоборот, зная физико-механические свойства селевой массы и контур страгивания, можно определить уклон предельного равновесия. Им были проведены опыты на лотках различной формы, которые удовлетворительно подтвердили теоретические выводы. К сожалению, такого набора исходных параметров в реальных условиях мы не имеем. Форма гидрографа в начальном створе задается в виде «падающей ветви кривой Гаусса», а для упрощения расчетов аппроксимируется прямой $Q=a–bt$. При движении вниз по руслу связной селевой массы происходит потеря определенной части расхода q от хвостовой части потока в силу наличия сопротивления предельного напряжения сдвига τ_0.

В адаптации В. И. Тевзадзе [205] уравнения Сен-Венана в области

$$\Omega = (0<X<\infty) \quad (0<t<\infty)$$

переменных x и t записывается в виде:

$$\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial x}-i_p+i_p=0, \tag{8.5}$$

$$B\frac{\partial h}{\partial t}+VB\frac{\partial h}{\partial x}+hB\frac{\partial V}{\partial x}+q(x,t)=0 \tag{8.6}$$

с начальными и граничными условиями:

$$h(x,\ 0) = V(x,\ 0) \quad x \in (0,\ \infty),$$

$$h(0,\ t) = 212\text{-}0{,}38t \quad t \in (0,\ 8),$$

$$V(0,t)=\frac{\rho_{см} g i_p h^2}{3\eta_{см}}k \quad t \in (0,\ 8).$$

Известно, что уравнения (8.5) и (8.6) представляют собой квазилинейную систему гиперболического типа, которая решается в данном случае по методу конечных приращений. Строится разностная сетка. Счет производится для различных значений Δx и Δt, удовлетворяющих условию Куранта, которое обеспечивает устойчивость разностной схемы до тех пор, пока $H > h_o + \varepsilon$.

Связный селевой поток останавливается в результате постепенного затухания скорости из-за уменьшения глубины и уклона русла. При известной плотности селевой массы глубина остановившегося слоя равна

$$h_0=\frac{\tau_{см}}{\rho_{см} g i}. \tag{8.7}$$

Анализ модели В. И. Тевзадзе показывает, что она описывает трансформацию характеристик селей, представленных сугубо вязкопластичной селевой массой. Она предполагает, что априори известны такие важнейшие характеристики селевой массы, как плотность, предельное напряжение сдвига (или контур страгивания). Кроме того, предполагается постоянство перечисленных характеристик во времени и пространстве, хотя известно,

что они чрезвычайно мобильны. Главным недостатком модели, по нашему мнению, является то, что в ней не предусмотрена возможность увеличения расхода и объема селя по мере его движения в результате захвата селевым потоком рыхлообломочных пород, слагающих русло.

К сколь серьезным последствиям приводит неправильная оценка характера селевого процесса, базирующаяся на результатах анализа следов прохождения селей, можно судить на примере мероприятий по защите альпинистского лагеря «Джайлык», располагавшегося в бассейне р. Куллумкол-Су (Северный Кавказ). Жилые и производственные строения лагеря были возведены на конусе выноса р. Куллумкол-Су, заросшего хвойным лесом.

В послевоенные годы селевые явления на этой реке наблюдались в 1958, 1961, 1973, 1975, 1977 гг. ТЭО «Защита альплагеря Джайлык в Кабардино-Балкарской АССР от селевых потоков» было утверждено в 1977 г. «Эксперты ТЭО значительно расходились в оценке прогнозируемых характеристик селей в наиболее опасном расчетном створе – вершине конуса выноса. На той стадии проекта для повторяемости 1 раз в 100 лет (P=1 %) были приняты следующие параметры: селевой расход Q_c=103 м^3/с, объем селя W_c=666 тыс. м^3, объем выносов твердых материалов $W_т$=114 тыс. м^3, плотность селя $\rho_{см}$=1,3 т/м^3 ...» [209]. Столь малое значение плотности селя, принятое для данного района, обосновывалось характером отложений крупных фракций в береговых валах и полях выносов. Отложения были представлены однородными по размерам глыбами (1–3 м в поперечнике), обращало на себя внимание практически полное отсутствие относительно более мелких фракций в промежутках между глыбами. Именно это послужило основанием для авторов проекта, а вслед за ними и экспертизе утверждать, что для данного района типичны так называемые водокаменные сели. Дальнейшие рассуждения определялись установившимися стереотипами: концентрация твердого компонента водокаменных селей определяется транспортирующей способностью водных потоков. Транспортирующая способность водного потока на уклоне менее 10° и реальном расходе паводка незначительна.

В рабочем проекте по защите альплагеря «Джайлык» от селей расчетная вероятность максимальных расходов селя была принята равной P=0,5 %, при этом Q_c=236 м^3/с, W_c=500 тыс. м^3, W_m=249 тыс. м^3, $\rho_{см}$=2,1 т/м^3.

Шел 1982 год. В работах В. А. Громова и В. Д. Кайнера [210, 211], написанных по материалам инженерно-геологических изысканий, выполненных в рамках проекта селезащиты «Джайлыка», обосновывается неизбежность распада «высокоплотной селевой массы», которая могла образоваться на морене ледника Западный Джайлык: «Ввиду малых углов наклона тальвега реки (9–12°) и предельно низкого содержания пылевато-глинистых частиц менее 0,05 мм (2,7–5,1 % в «мелкоземном» заполнителе), необходимого для образования суспензии, дальнейшее продвижение высокоплотного селевого потока невозможно» [211].

Характеристики вероятного селя оценивались на основе расчетов по модели, приведенной в работе [210]. Из этой модели следует, что при силе инерции, равной нулю, селевая масса не может перемещаться на уклоне,

меньшем, чем определяемый из выражения

$$tg\alpha = \frac{(\rho_T - \rho_0)(1 - W_0)}{\rho_T (1 - W_0) + \rho_0 W_0} tg\varphi^*, \qquad (8.8)$$

где W_o – объем жидкого компонента в долях единицы или динамическая пористость селевого потока; $(1–W_o)$ – объем твердого компонента, доли ед.

«Нетрудно заметить, пишут авторы [210], что формула (8.8), выведенная из условия равномерного движения единичного селевого объема, аналогична формуле Ю. Б. Виноградова, полученной из условия динамического равновесия рыхлообломочной породы ...» «... при $\alpha > \alpha_{кр}$ будет происходить распад уже сформировавшейся высокоплотной селевой массы».

19 июля 1983 г. в результате выпадения дождя ливневого характера сформировался сель, который не только не распался на уклонах 9–12°, но углубил русло р. Куллумкол-Су на 10–12 м и «... в 8 ч 35 мин вся движущаяся селевая масса отложилась в пределах сооружений лагеря». Последующие четыре селевых вала были для лагеря последними [209].

По иронии судьбы статья В. Д. Кайнера и В. А. Громова [211], посвященная обоснованию защиты «Джайлыка», в которой утверждалось, что «... игнорирование трансформации (в нашем случае распада селевой массы), т.е. механический перенос всего рыхлообломочного материала из очага зарождения в расчетный створ (конус выноса р. Куллумкол-Су), сильно исказит, в данном случае завысит параметры селя и, как следствие, увеличит стоимость селезащитных мероприятий», вышла в свет в 1984 г., т.е. через год после того, как альплагерь перестал существовать.

8.2. Модель трансформации селя

При обсуждении хода селевых процессов мы неизбежно сталкиваемся с относительностью понятия трансформации. Ранее место процессу трансформации было определено за пределами селевого очага. Но как установить конец селевого очага? Прежде чем попытаться ответить на поставленный вопрос, дадим определение началу селевого очага. Начало селевого очага – верхний створ участка потенциального селевого массива, в котором возможна реализация одной из ситуаций:

вовлечение в селевой процесс сосредоточенным водным потоком рыхлообломочных пород, вмещающих русло водотока;

увлажнение рыхлообломочных пород, а в некоторых ситуациях и появление водного (суспензионного) потока на их поверхности приводит к сдвигу водонасыщенных пород и последующему формированию селевого потока.

Конец же селевого очага не имеет четкой границы, ибо процесс обогащения селевого потока твердым компонентом с уменьшением уклона может переходить в процесс частичного распада селевой массы, а затем, с увеличением уклона, вновь возобновляться. И так вплоть до остановки селевой массы или практически ее полного распада и перехода в паводок.

Те участки, на которых при большом расходе селевого потока происходит его обогащение твердым компонентом, становятся зонами частичного распада или остановки при относительно малых расходах селей. Если объем селей мал, интенсивность отложений даже на относительно больших уклонах может быть существенно выше, чем интенсивность набора рыхлообломочных пород в селевой процесс. Это приводит к быстрому затуханию селевого процесса. Отложения таких селей становятся источником питания крупных селей. Следовательно, для каждого конкретного селя длина селевого очага будет меняться, соответственно будет блуждать и конец селевого очага – условный створ, обозначающий, по сути, переход от формирования селя к его регрессу.

Таким образом, мы вправе рассматривать стадию формирования селя как процедуру набора рыхлообломочных пород, а она, как мы знаем по определению, является составной частью процедуры трансформации. Тогда и весь селевой процесс можно рассматривать как процесс трансформации характеристик селей.

Сложность селевого процесса заставляет нас расчленить его на подпроцессы, а модель представлять в виде пакета моделей. Тогда построение модели сводится к раскрытию связей между блоками, их систематизации и построению абстрактной структуры. Воспользуемся определением модели сложной динамической системы И. М. Яглома [212] как математической структуры в смысле Н. Бурбаки, неопределяемые объекты и отношения которой принимаются как те или иные объекты реального мира и реально существующие отношения между ними. Математическая структура Н. Бурбаки – это система

$$S=< M, R_1, R_2,..., R_k >,$$

состоящая из определенного основного множества

$$M=\{a, b, c, ...\}$$

и заданных на этом множестве отношений $R_1, R_2, R_3, ..., R_k$. Основные свойства отношений R задаются аксиомами, которые обязательно включаются в полное описание структуры

$$<M, R>.$$

Основой структурного подхода является аксиоматический метод. Возрождение аксиоматического метода связано с именем Д. Гильберта. Главная его мысль, как пишет И. М. Яглом, заключалась в том, что каждая самостоятельная область математики должна быть построена аксиоматично. С ним связано и отчетливое понимание произвольности выбираемых основных элементов дедуктивной теории и связывающих эти элементы аксиом. Аксиоматика учит искать глубокие причинные связи между различными явлениями, находить и извлекать общие идеи, скрывающиеся за деталями, и подвергать их исследованию. Но особенно важно то, что «аксиоматический метод позволяет, когда дело касается сложных математических объектов, расчленить их свойства и перегруппировать эти свойства вокруг некоторых понятий, т.е. классифицировать свойства по структурам, которым они принадлежат» [213].

Таким образом, в основе структурного метода лежит выявление структуры как совокупности отношений, инвариантных при некоторых преобразованиях. Элементами математической структуры модели трансформации селевого потока являются основные характеристики русла и селевого потока – реологические: вязкость $\eta_{см}$, предельное напряжение сдвига $\tau_{см}$; гидравлические: глубина H_c, скорость движения V_c; энергетические: мощность, затрачиваемая потоком на взвешивание частиц селеформирующих пород $N_{п.взв}$, и мощность, которую необходимо затратить на их взвешивание $N_{взв}$.

Задаем систему аксиом, касающихся основных элементов структуры. Кроме того, отношения между элементами частично определяются при описании отдельных процессов, составляющих трансформацию набора рыхлообломочных пород, отложения на подстилающей поверхности и частичного распада селевой массы. Каждую такую подмодель можно рассматривать как математическую структуру более низкого уровня подструктур. Другие связи будут выведены из аксиом и определяемых отношений подструктур.

Аксиомами математической структуры модели трансформации селей являются аксиомы теории существования селевой массы и основополагающие аксиомы упомянутых подструктур.

8.2.1. Аксиомы формирования селя

Сосредоточенный водный поток с расходом выше критического значения при определенных условиях (достаточное количество рыхлообломочных пород и уклон больше критического) трансформируется в селевой поток. В процессе селеформирования принимают участие частицы рыхлообломочной породы практически всех крупностей.

Грязекаменные потоки, твердый компонент которых представлен полидисперсными частицами, включающими валунно-глыбовые фракции, не образуются на малых уклонах (<5°).

8.2.2. Аксиомы существования селевой массы

Селевой процесс как отклик сложной системы «русло (селевой очаг) – поток» при $t\to\infty$ (или $l\to\infty$) и α=const стремится к динамическому равновесию, которое характеризуется таким состоянием селевой массы, при котором не происходит изменение ее плотности.

Равновесное состояние наступает в результате обогащения селевой массы рыхлообломочными породами и формирования при этом селевой массы предельной (максимальной для данных условий) плотности или частичного распада селевой массы до плотности, минимальной для данных условий взвешивания частиц, или остановки.

В составе селевой массы во взвешенном состоянии могут перемещаться только фракции, гидравлическая крупность которых (с учетом пластичности селевой массы, действия архимедовой силы и степени стесненности

падения частиц) не превышает максимальных поперечных значений скорости в селевом потоке, обусловленных взаимодействием селевого потока с шероховатостью, размеры которой могут быть соизмеримы с глубиной потока. Такое взаимодействие приводит к перемешиванию селевой массы, механизм которого может в корне отличаться от механизма перемешивания, описываемого теорией турбулентности.

Предельное содержание частиц, гидравлическая крупность которых не превышает поперечных пульсаций скорости в селевом потоке, зависит от энергии, которой обладает селевая масса, принимающая участие в перемешивании. Предельная плотность селевой массы определяется минералогическим и гранулометрическим составами рыхлообломочных пород. При достижении предельной плотности селевая масса теряет текучесть.

Реологические свойства селевой массы: вязкость и предельное напряжение сдвига являются непрерывными функциями плотности. Селевая масса, обладающая вязкопластическими свойствами в мере, достаточной для того, чтобы все частицы ее твердого компонента находились в квазивзвешенном состоянии, перемещается без распада и остановки в слое

$$h_\tau \geq \frac{\tau_{см}}{\rho_{см} g \sin\alpha}. \qquad (8.9)$$

8.2.3. Аксиома распада селевой массы

При частичном распаде селевой массы происходит осаждение тех частиц, гидравлическая крупность которых превышает величины поперечных пульсаций скорости в потоке.

Построение структуры модели трансформации селей требует создания математического образа элементов системы. В простейшем случае элементами системы являются селевое русло и сам селевой поток. Поскольку на различных участках русла, в зависимости от его морфометрических, геологических и других характеристик, могут протекать различные процессы, русло разбивается на характерные участки *i*. Характерными признаками участков русла могут быть уклон, геологические особенности (например, выходы коренных пород, скопление валунов и т.п.), резкие перегибы продольного профиля, изгибы русла в плане, благодаря которым возможны изменения в ходе селевого процесса. После такого разбиения имеем набор характеристик, представляющих русло и являющихся неопределяемыми (первичными) элементами модели: $\{\Delta l_i\}$, $\{\alpha_i\}$, $\{B_i\}$, $\{\beta_i\}$. В пределах Δl_i все остальные характеристики считаются постоянными величинами.

Указанные ниже основные характеристики селевого потока являются определяемыми элементами – компонентами структуры: $\{d_{75i}\}$, $\{\eta_i\}$, $\{\tau_{смi}\}$, $\{V_i, H_i\}$, $\{C_{пр}\}$, $\{N_{взв\,i}, N_{п.взв\,i}\}$. По сути своей компоненты – это законченные математические модели, описывающие изменение характеристик селевого потока и селевой массы в зависимости от расхода селя и морфометрии пути его движения, плотности селевой массы, минералогического и гранулометрического составов его твердого компонента.

Блоками (объектами) структуры, как мы их определили, являются модели, описывающие следующие подпроцессы:

обогащение селевого потока твердым компонентом (набор);

обеднение селевой массы твердым компонентом (частичный распад);

отложение селевой массы в русле или на конусе выноса;

остановка селя.

Иерархия структуры модели трансформации селевого потока показана на рисунке 8.2.

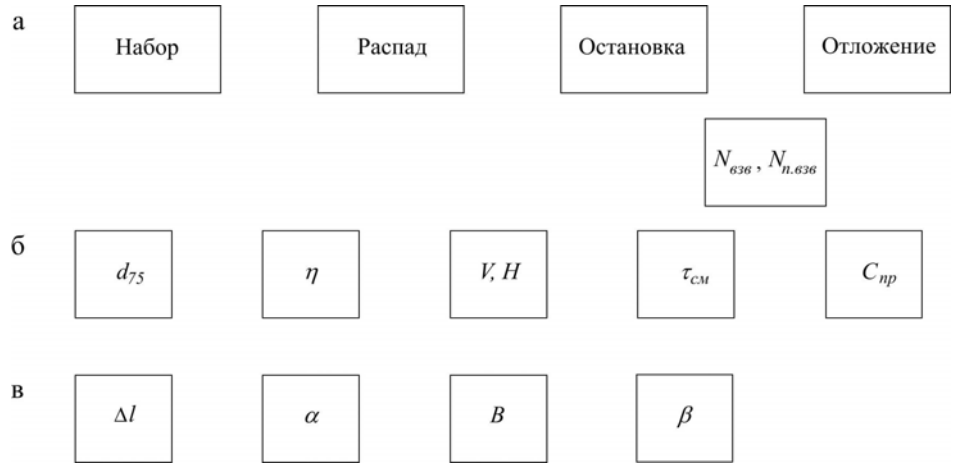


Рисунок 8.2. Иерархия структуры модели трансформации селевого потока.
а – блоки (подпроцессы); *б* – компоненты – определяемые элементы (характеристики селевого потока); *в* – неопределяемые элементы (характеристики русла)

Особая роль принадлежит модели состояния селевой массы. С ее помощью строится фазовый портрет селевого процесса, т.е. определяется направление эволюции селевого процесса: обогащение селевой массы рыхлообломочной породой или частичный распад селевой массы.

Гидрограф водного потока разбивается на интервалы N_j. При соблюдении аксиом формирования селей ($\alpha_i \geq 12°$, $Q_0 \geq Q_{кр}$) есть предпосылки к началу селевого процесса. Поэтому на первом участке (в селевом очаге) всегда идет формирование селевого потока – работает блок набора (рисунок 8.3). В результате вовлечения в селевой процесс рыхлообломочных пород увеличиваются плотность селевой массы, расход и объем селевого потока. Вообще всякий раз в результате тех или иных процессов взаимодействия водного потока с руслом изменяется плотность селевой массы, а вслед за ней и все характеристики селевого потока, которые мы определили как компоненты структуры модели.

Одновременно меняется и состояние процесса: новое значение плотности селевой массы, которое мы относим к входному створу второго участка с номером i_2 (или иного последующего участка с номером $i_{n+1(2,3,\ldots)}$), и его морфометрии задают точку на фазовой плоскости системы $M(\rho_i, \alpha_i)$. Состояние устойчивого равновесия при этом также изменится, поскольку меняются условия взвешивания.

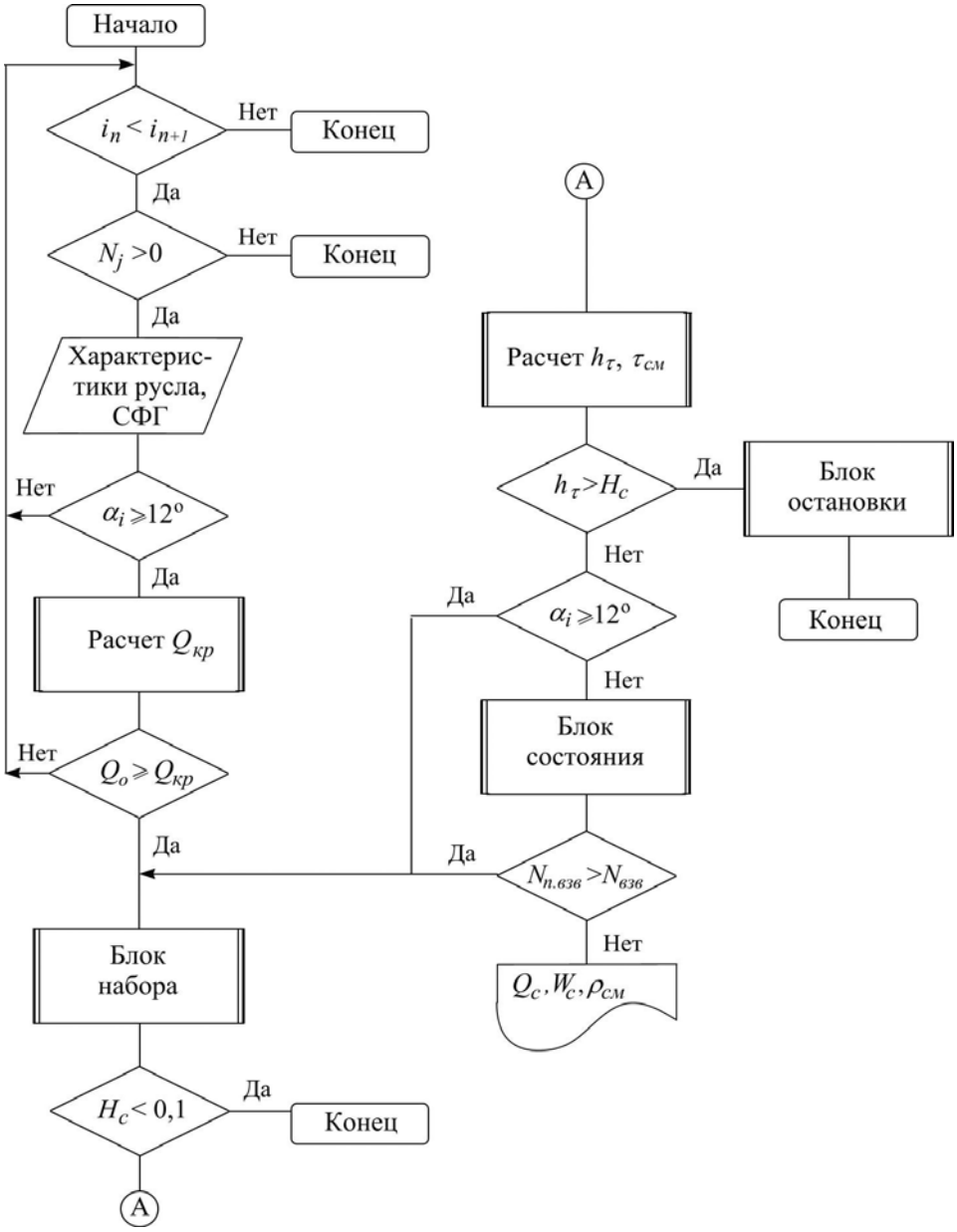


Рисунок 8.3. Блок-схема модели трансформации селевого потока (в селевом очаге)

Для определения фазы процесса рассчитывается мощность, которую необходимо затрачивать в данных условиях для поддержания частиц во взвешенном состоянии $N_{взв}$, ее значение сравнивается с мощностью, которой располагает (в тех же условиях) поток на взвешивание $N_{п.взв}$.

Выполнение условия $N_{п.взв} > N_{взв}$ означает, что энергетические возможности селевого потока не используются в полной мере и он способен

обогащаться рыхлообломочной породой. Это обстоятельство является признаком фазы набора. Если же это условие не выполняется, неизбежен частичный распад селевой массы, в результате которого селевой поток освобождается, прежде всего, от наиболее крупных фракций. В случае, когда селевая масса обладает вязкопластическими свойствами $\tau_{см}$, происходит ее отложение в русле. Когда глубина селевого потока H_c становится меньше мощности его ядра h_τ, обусловленной проявлением вязкопластичности селевой массы, происходит ее остановка, селевой процесс заканчивается.

Логика отношений между блоками структуры модели, определяемая физикой процесса взаимодействия потока с руслом, указывает на неизбежность изменения характеристик селевого потока, поэтому всякий раз необходимо обращаться к компонентам. Это обращение может быть из блоков, а также из любой точки структурной схемы.

Определив связи между блоками и компонентами, мы очертили структуру модели селевого процесса как абстрактного инварианта, на основе которого в зависимости от конкретных условий образуются его варианты.

8.2.4. Модель набора рыхлообломочных пород

Модель набора в ситуациях, когда не учет сцепления грунта приводит к недопустимым погрешностям при определении характеристик селей, описана в работах [214, 215]. Интенсивность вовлечения грунта в селеформирование в обсуждаемой модели ставится в прямую зависимость от эродирующей способности селевой массы *Э* и в обратную зависимость от устойчивости селеформирующих пород *У*. Как и в модели Ю. Б. Виноградова, интенсивность вовлечения находится в прямой зависимости от величины работы, совершаемой селевым потоком на единичном пути за единицу времени *n*.

$$\frac{dG}{dl} = c\frac{Э}{У}n, \tag{8.10}$$

где G – объем грунта, вовлекаемый в селеформирование на единичном пути, м^3; l – длина селевого очага, м; c – коэффициент пропорциональности, (м·с^2)/кг.

Решение этого уравнения применительно к условиям, характерным для селевых процессов, протекающих при искусственном воспроизведении селей на Шамалганском полигоне, приведено в работе [214]. Опыт практического применения модели показал, что изменчивость геологических и морфометрических характеристик селевых очагов исключает возможность использования при расчетах осредненных значений уклонов, влажности грунтов и т.д. В то же время стало очевидным, что и представление перечисленных факторов в виде аналитических функций для использования их при решении задач в интегральной форме нерационально в силу громоздкости вычислений.

Расчеты значительно упрощаются, если использовать следующий алгоритм. Расчетный участок разбивается на несколько участков, в каждом из которых уклон, состав и строение грунта не изменяются. Длина участков

Δl должна быть такой, чтобы на каждом из них можно было пренебречь влиянием изменения эродирующей способности селевой массы и расхода селевого потока.

Проведем расчет характеристик селя для i-го участка, характеризующегося наклоном α_i, устойчивостью грунта к эрозии $У_i$, пористостью ε_i и относительной объемной влажностью ζ_i. На вход i-го участка с предыдущего участка поступает селевая масса с расходом $Q_{c(i-1)}$, плотность селевой массы $\rho_{c(i-1)}$; гранулометрический состав твердого компонента селевой массы $Г_{(i-1)}$.

Указанная информация позволяет вычислить приращения $\Delta Q_{вi}$ – водного, $\Delta Q_{тi}$ – твердого и ΔQ_{ci} – селевого расходов при прохождении селем i-го участка:

$$\Delta Q_{Bi} = C\zeta_i \frac{Э_i}{У_i} \rho_{см(i-1)} g \sin\alpha_i Q_{c(i-1)} \Delta l_i, \tag{8.11}$$

$$\Delta Q_{тi} = C(1-\varepsilon_i) \frac{Э_i}{У_i} \rho_{см(i-1)} g \sin\alpha_i Q_{c(i-1)} \Delta l_i, \tag{8.12}$$

$$\Delta Q_{ci} = C(1-\varepsilon_i+\zeta_i) \frac{Э_i}{У_i} \rho_{см(i-1)} g \sin\alpha_i Q_{c(i-1)} \Delta l_i. \tag{8.13}$$

Выражения (8.11)–(8.13) дают возможность определить расход селевой массы Q_{ci} и ее плотность ρ_{ci} в створе, замыкающем i-й участок:

$$Q_{ci} = Q_{c(i-1)} + \Delta Q_{ci}, \tag{8.14}$$

$$\rho_{смi} = \frac{\rho_{см(i-1)} Q_{ci} + \rho_o \Delta Q_{вi} + \rho_T \Delta Q_{Ti}}{Q_{c(i-1)} + \Delta Q_{вi} + \Delta Q_{Ti}}. \tag{8.15}$$

На рисунке 8.4 приведены результаты определения характеристик селей, полученные с помощью описанного алгоритма. Нетрудно видеть, что с уменьшением шага квантования погрешность расчета расхода селя по упрощенному алгоритму уменьшается.

На рисунке 8.5 приведена зависимость расхода селя от угла наклона селевого очага и влажности селеформирующих пород при следующих исходных данных: ρ_T=2650 кг/м^3, $Q_в$=50 м^3/с, l=1000 м, $У$=0,775, θ=0,11 соответствует влажности грунтов, характерных для Иле Алатау, на пределе текучести, θ=0,16 – влажность тех же грунтов при полном заполнении пор водой.

На рисунке 8.6 показана зависимость расхода селя от влажности грунтов и длины селевого очага. Исходные данные: α=20°, $Q_в$=50 м^3/с и ρ_T=2650 кг/м^3.

Следует обратить внимание на характер изменения кривых, соответствующих минимальному и максимальному увлажнению селеформирующих пород. При нулевой влажности грунтов максимальный расход определяется соотношением твердого и жидкого компонентов, соответствующим влажности селевой массы на пределе ее текучести. При влажности грунтов, превышающей влажность селевой массы на пределе текучести, расход селя неограниченно возрастает. Объясняется это тем, что для образования селевой

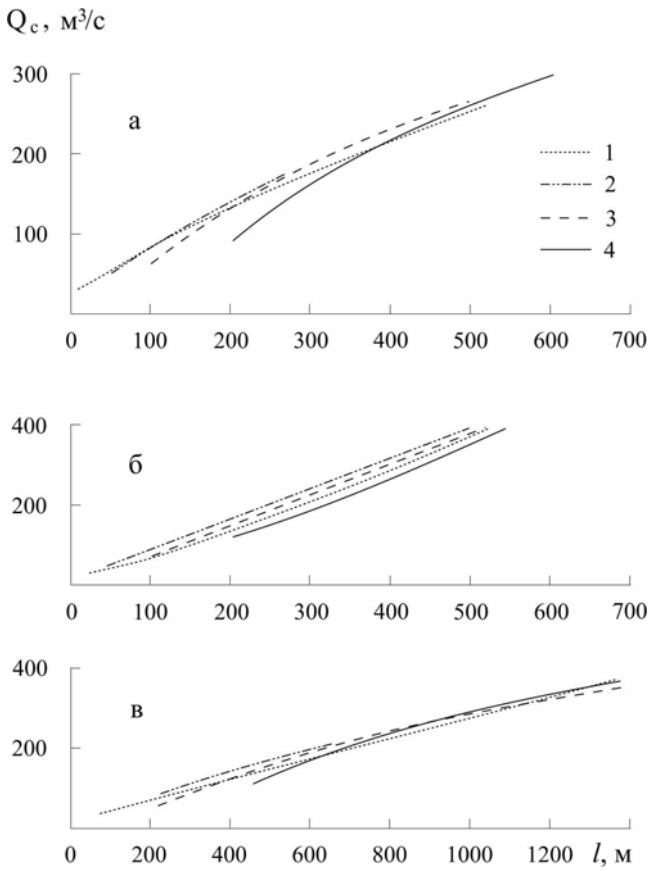


Рисунок 8.4. Графики изменения расхода селя по длине русла, полученные путем: *1* – решения дифференциального уравнения (8.10); *2–4* – численным методом с разным шагом дискретизации, равным 50 м (*2*), 100 м (*3*), 200 м (*4*), при $Q_в$=30 м^3/с. *а* – α=30°, θ=0,03; *б* – α=30°, θ=0,1; *в* – α=17°, θ=0,03

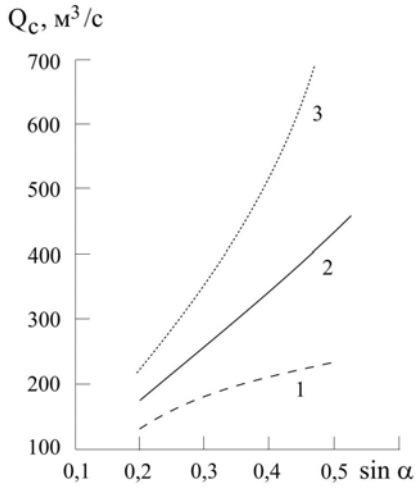


Рисунок 8.5. Зависимость расхода селя от уклона селевого очага, рассчитанная при различной влажности селеформирующих пород. *1* – θ=0,02; *2* – θ=0,11; *3* – θ=0,16

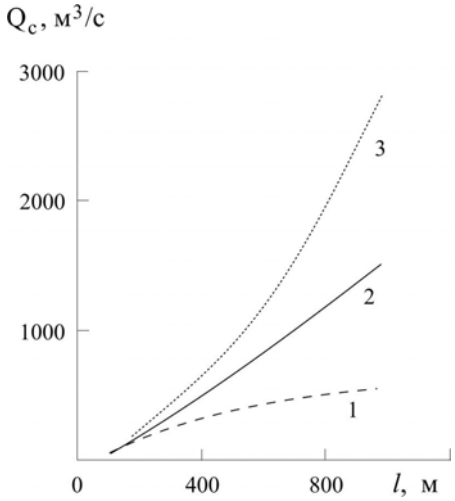


Рисунок 8.6. Изменение расхода селя по длине селевого очага.
1 – θ=0,02; 2 – θ=0,11; 3 – θ=0,16

массы необходимо лишь совершить работу по разрушению структуры грунта и его перемешиванию.

Зависимость плотности селевой массы от влажности селеформирующих пород и длины селевого очага приведена на рисунке 8.7.

Рисунок 8.8 иллюстрирует изменение $\Delta G/\Delta l$. Исходные данные: Δl=100 м, α=20°, $Q_в$=50 м^3/с, $У$=0,3.

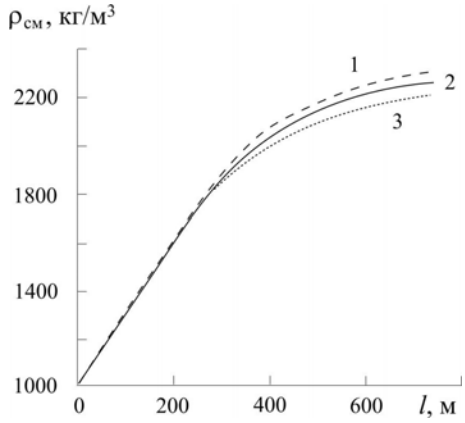


Рисунок 8.7. График изменения плотности селевой массы по длине селевого очага при постоянном значении устойчивости грунтов к эрозии и различной влажности.
1 – θ=0,02; *2* – θ=0,11; *3* – θ=0,16

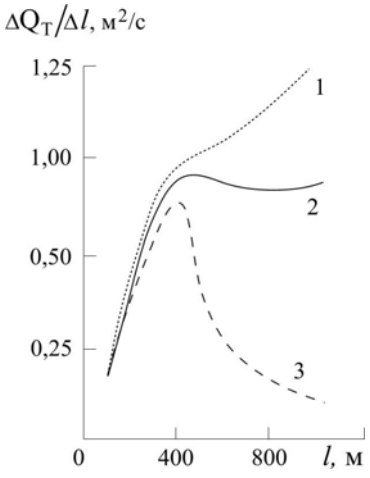


Рисунок 8.8. Приращение расхода твердого компонента селевой массы, приходящегося на единицу длины русла, для различной влажности грунтов.
1 – θ=0,16; *2* – θ=0,11; *3* – θ=0,02

Результаты сопоставления фактических и расчетных данных свидетельствуют о вполне приемлемом для современного уровня знаний соответствии модели реальным процессам селеформирования, имевшим место при взаимодействии сосредоточенного водного потока с рыхлообломочными породами. В качестве примера на рисунке 8.9 приведены некоторые данные, полученные в результате геодезической съемки селевых очагов, и соответствующие им данные расчета по модели эрозионно-сдвигового селевого процесса. Исходные данные: ρ_T=2650 кг/м^3, α=12°, $Q_в$=50 м^3/с, $У$=0,775.

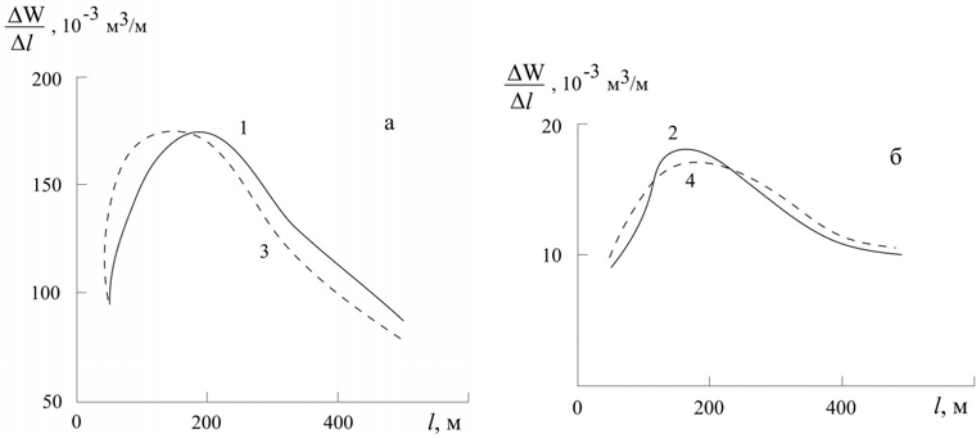


Рисунок 8.9. Интенсивность вовлечения рыхлообломочных пород в селевой процесс (бассейн р. Шамалган). *а* – для всего селевого очага: *1* – экспериментальная и *3* – рассчитанная кривые; *б* – по результатам воспроизведения селевых потоков 1972–1978 гг.: *2* – экспериментальная и *4* – рассчитанная кривые

На рисунке 8.9 цифрой *1* обозначена функция $\Delta W/\Delta l$, которая описывает изменение объема Шамалганского селевого очага (возникшего в результате природных процессов на рубеже XIX–XX веков) в зависимости от его длины. Цифрой *2* обозначена функция $\Delta W/\Delta l$, построенная по данным о суммарных объемах «размыва» грунта в экспериментах КазНИГМИ по искусственному воспроизведению селей 1972–1978 гг. Необходимость в суммировании объемов размывов, образовавшихся при проведении этих экспериментов, вызвана кратковременностью искусственно создававшихся селевых процессов, вследствие чего из-за неоднородности характеристик селеформирующих пород «размывы» за один процесс в значительной мере носили случайный характер. На том же рисунке представлены и результаты вычислений (кривые *3*, *4*).

На рисунке 8.10 приведены экспериментальные и расчетные аналогичные данные для селевого очага, сформировавшегося в бассейне р. Каскелен в 1980 г. Существенная разница в данных, имеющих место в начале и конце селевого очага, объясняется спецификой формирования. Превышение реальных значений $\Delta W/\Delta l$ над расчетными в начале селевого

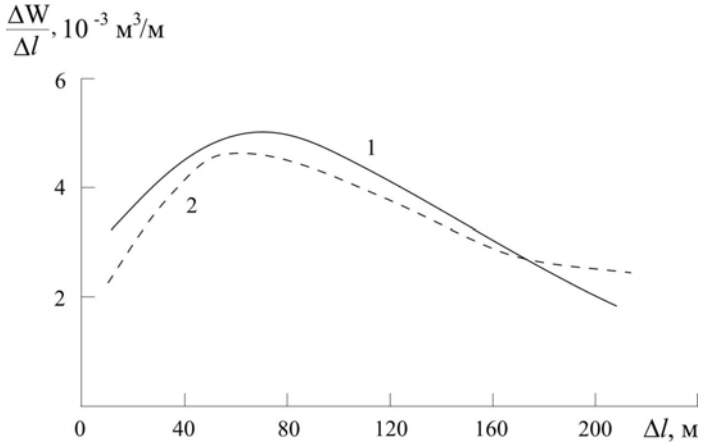


Рисунок 8.10. Интенсивность вовлечения рыхлообломочных пород в селевой процесс для бассейна р. Каскелен (Иле Алатау).
1 – экспериментальные; *2* – рассчитанные данные

очага обусловлено, скорее всего, пятящейся эрозией, имевшей место при селеформировании. Вследствие этого затраты энергии на единицу длины селевого очага в указанном месте существенно превышали среднее значение.

Превышение расчетных значений $\Delta W/\Delta l$ над реальными в конце селевого очага объясняется относительным увеличением устойчивости грунта к эрозии, обусловленного особенностями морфометрии древней морены, в которой образовался селевой очаг.

8.2.5. Модель распада селевой массы

Процессы распада селевой массы и ее отложения настолько специфичны, что по характеру отложений можно судить о характере селевых процессов, приведших к отложению. Отложение селевой массы может происходить в русле в результате частичного ее распада (гряды, береговые валы) или отложения вязкопластической селевой массы на бортах русла в виде обмазок и береговых террас, а также в долинах на выходе из гор в виде конусов выноса и полей выноса (конечные селевые отложения).

Морфометрические характеристики конусов выноса определяются масштабом и повторяемостью селевых явлений, а также свойствами селевой массы. Чем меньше расход селей, тем больше вероятность частичного распада селевой массы и проявления кулоновского трения, ярче выражены формы конусов выноса на фоне других морфологических образований, больше углы наклона к горизонту их образующих.

Конусы выноса являются природными банками данных, хранящими информацию об объеме селей, их возрасте и свойствах селевой массы, накопившуюся за многие тысячи лет. Заглянуть в такие хранилища помогают карьеры нерудных материалов, а также котлованы под фундаменты зданий и сооружений, располагающиеся на конусах выноса.

В отличие от водных потоков, которые при определенных расходах растекались бы по всей поверхности конусов выноса одновременно, сели, формируя селевые валы, ограничивающие возможность растекания селевой массы, движутся по конусам выноса относительно узкими полосами. При малых объемах селей основная часть селевой массы останавливается в верхних зонах конусов выноса, при больших – формируются и периферийные зоны конусов выноса.

Изменение направления движения селей, обусловливающее равномерное отложение селевой массы по всей поверхности конусов выноса, может вызываться следующими причинами. Если при движении селевой массы происходит их частичный распад, дно русла приподнимается над поверхностью конуса выноса, создаются условия для прорыва береговых валов и, как следствие, изменения направления движения селей. При этом вновь формируются береговые валы, ограничивающие растекание селевой массы и т.д.

Примером практически полного перекрытия конуса выноса селевыми отложениями за один процесс могут служить события, разыгравшиеся в бассейне р. Средний Талгар (Иле Алатау) в 1979 г. Селевой поток образовался в результате прорыва воды, накопившейся в котловине, расположенной на современной морене ледника Спортивный на высоте 3350 м. Сброс воды с объемом 87 тыс. $м^3$ произошел по внутриморенным каналам стока длиной около 200 м. Закупорка каналов стока, приведшая к образованию озера, произошла впервые, как минимум, за последние 16 лет, о чем свидетельствуют материалы аэрофотосъемок этого района в 1964–1977 гг. [23]. На это указывает и наличие на конусе выноса елей, возраст которых колеблется от 10 до 100 лет.

Движение водного потока с расходом 3–10 $м^3/с$ по современной морене не приводило к существенным размывам грунта, в основном плотная селевая масса формировалась в небольшом селевом очаге, расположенном на фронтальном уступе древней морены. Поскольку плотность селевой массы не превышала 2200–2300 $кг/м^3$, движение селя на конусе выноса, несмотря на значительные уклоны (7–10°), сопровождалось частичным распадом селевой массы. В совокупности с незначительными расходами (кубометры, первые десятки кубометров в секунду) это приводило к непрерывному изменению направления движения селевого потока. В результате сель с объемом 0,2 млн $м^3$ отложился на площади 58 тыс. $м^2$, перекрыв почвенный слой, образовавшийся на конусе выноса [23].

Если селевая масса обладает выраженными вязкопластическими свойствами, увеличение мощности селевых отложений на конусе выноса происходит поэтапно: от селя к селю, зона отложений перемещается на участки, имеющие относительно низкие высотные отметки.

Характер отложений на селевых полях выносов определяется морфометрическими характеристиками долин, гидрографами селей и свойствами селевой массы. Плотная селевая масса, обладающая вязкопластическими свойствами в мере, достаточной для поддержания твердого компонента в квазивзвешенном состоянии, при остановке в долинах образует ровные

поля, лишь наиболее крупные частицы могут выступать над поверхностью отложений.

В случаях, когда предельные напряжения сдвига не превышают долей ньютона на квадратный метр, образование полей выноса сопровождается дифференциацией частиц по крупности. Примером сказанного могут служить отложения селевой массы, сформировавшейся на современной морене при прорыве озера на леднике пика Советов (Иле Алатау) в 1977 г., на уступе древней морены перед входом в основной селевой очаг.

Порой характер отложений на селевых полях выносов может вводить в заблуждение не только проектировщиков, но даже селеведов, осуществляющих экспертизу проектов защиты объектов от селей.

Расчет объема отложений селей на конусах и полях выноса представляет достаточно сложную, не решенную в настоящее время задачу. Процесс отложений в русле рассчитывается в первом приближении достаточно просто, он включается в общую схему определения трансформации селей.

Как было отмечено, расчет трансформации характеристик селей ведется по участкам, имеющим, как правило, различную морфометрию. Если объем селя велик, а на расчетном участке происходит частичный распад селевой массы, морфометрические характеристики этого участка претерпевают существенные изменения, которые нельзя не учитывать в дальнейшем. Для этого расчет на участках отложения должен вестись по «порциям» селя. Определение морфометрических характеристик осуществляется после того, как через расчетный участок «прогоняется» *n*-я часть общего объема селя.

В основу расчета отложений твердого компонента селевой массы, происходящих в русле, положено утверждение, что в процессе частичного распада происходит осаждение тех частиц, гидравлическая крупность которых превышает величины поперечных пульсаций скорости в селевом потоке. При этом в первую очередь выпадают наиболее крупные фракции, затем фракции последующего интервала гранулометрического состава твердого компонента селевой массы и т.д. до тех пор, пока мощность, необходимая для взвешивания твердых частиц, не станет меньше мощности, которой располагает поток на взвешивание. При выпадении частиц образуется неподвижный жесткий каркас, опирающийся на дно русла. Промежутки каркаса заполняются селевой массой, состоящей из воды и фракций, меньших по размерам, чем частицы, из которых образуется каркас. При этом изменяется не только уклон участка русла, но и форма его поперечного сечения [4].

8.3. К определению уравнительного уклона селевых отложений в селехранилищах

Основным способом защиты от селей на северном склоне Иле Алатау и прилегающей к нему территории в настоящее время является аккумуляция селевой массы в селехранилищах. Селехранилища создаются путем сооружения плотин в горных долинах. Насколько важным для определения

высоты плотины (при обосновании расчетного значения объема селехранилища) является задание величины уклона уравнительной поверхности, можно видеть из сведений, приведенных в работе А. С. Деговец и Э. Р. Козьминых [216]. Так, увеличение уклона уравнительной поверхности отложений селя от нуля до 2º, приводит к удвоению расчетной емкости селехранилища.

Поскольку установление расчетного объема селехранилища имеет, в полном смысле этого слова, жизненно важное значение, остановимся на определении уравнительного уклона более подробно. Прежде всего, уточним назначение селехранилищ, созданных в долинах северного склона Иле Алатау. Как следует из проспектов, издаваемых Казселезащитой [217, 218], неотложность проведения большого комплекса работ вызвана, прежде всего, необходимостью защиты населенных пунктов и народнохозяйственных объектов от селевых потоков. Задержание наносов, транспортируемых реками, не актуально для рассматриваемого района. Объясняется это тем, что отмостка русел формируется мощными паводками, завершающими селевые явления. Крупность частиц, образующих отмостку, такова, что рядовые паводки не способны оказывать существенное влияние на величину твердого стока вследствие перестройки отмостки русел. Размеры же частиц, попадающих в русла рек за счет склонового стока, столь незначительны, что они транзитом переносятся реками далеко за пределы конусов выноса, замыкающих долины горных рек.

Следовательно, для практики защиты населенных пунктов гораздо важнее значение максимального объема селя, который будет задержан в селехранилище (в ходе его разового заполнения) до начала перелива селевой массы через гребень плотины, чем объем наносов, который задержит плотина за несколько десятилетий. Объем разового заполнения в решающей мере определяется уравнительным уклоном, который образуется в ходе единовременного заполнения селехранилища селевой массой. Его значение может сильно отличаться от объема, образующегося при долговременном заполнении селехранилища твердым стоком.

В работе А. С. Деговца и Э. Р. Козьминых [216] утверждается, что приведенные в ней данные «… позволяют внести в строительные нормативные требования … следующие поправки:

для глухих плотин проектный уклон занесения селехранилищ принимать не горизонтальным, а равным 3–4 %, что увеличит расчетную емкость в 1,5–2 раза;

при назначении проектного уклона занесения селехранилищ для одиночных сквозных плотин следует принимать поправочный коэффициент от бытового уклона русла не 0,5, а 0,8, что обеспечит увеличение расчетной емкости в 3 раза …».

Прежде чем давать оценку правомерности внесения рекомендуемых поправок, отметим различие в терминологии, используемой в СНиП и работе [216]. В СНиП использованы термины «уравнительный уклон селевых отложений» и «заиление селехранилища», и это не случайно. Физические процессы, приводящие к формированию «уравнительного уклона» или

«заилению», имеют существенные отличия. Даже временные их масштабы отличаются в десятки (сотни) тысяч раз: уравнительный уклон отложений селей может образоваться менее чем за час, в то время как заиление, по требованию СНиП, должно занимать не менее 25 лет.

В подтверждение своих выводов А. С. Деговец и Э. Р. Козьминых [216] ссылаются на исследования М. А. Великанова: «… Теоретически это положение было ранее доказано в работе М. А. Великанова …» [219], забывая при этом, что такой вывод относится к конечной стадии заиления. Первая стадия, по М. А. Великанову, «… всегда завершается получением равной, одинаковой глубины во всем подпертом бьефе …» [219], т.е. поверхность отложений близка к горизонтальной. Далее М. А. Великанов замечает: «… Процесс наращивания дна вверх по течению идет настолько медленно по сравнению с предшествовавшим ему процессом наращивания дна вниз по течению, что в естественных условиях для этого требуется промежуток времени, несравненно больший, чем для завершения всего процесса первой стадии …».

Для глухих плотин проектный уклон занесения селехранилищ рекомендуется принимать не нулевым, а равным 3–4 %. Основанием для такой рекомендации, вероятно, послужил тот факт, что «… фактический уклон отложения селя 1973 г. в селехранилище р. Малая Алматинка составил 0,02, а сель 1977 г. отложился на Большой Алматинке в зоне строившегося селехранилища параллельно естественному руслу с уклоном 0,06» [216]. К сожалению, авторы статьи не поясняют, как получено значение «фактического уклона», равного 0,02, для отложений 1973 г. в селехранилище р. Киши Алматы.

Результаты детальной съемки, выполненной специалистами КазНИГМИ в 1973–1974 гг., говорят о том, что 360-метровый участок отложений, примыкающий к плотине, имел уклон 0,0056, примыкающий к нему 100-метровый участок – 0,01, третий 103-метровый участок – 0,0184 и лишь четвертый участок длиной 201 м – 0,0298 (рисунок 8.11) [220]. Сведения, приведенные на рисунке 8.11, позволяют утверждать, что поверхность большей части объема отложений селя 1973 г. имеет уклон, не превышающий 0,5º.

Отложение селя 1977 г. на р. Улькен Алматы произошло за пределами селехранилища, а так как величина уравнительного уклона зависит от мощности отложений, уклон маломощных отложений в долине не может приниматься за уклон отложений в селехранилище. Это утверждение хорошо подтверждается данными экспериментов А. И. Квасова [221] (рисунок 8.12).

По А. И. Квасову, «… профили отложений реальной селевой массы в верхнем бьефе сооружения схематично можно подразделить на три участка: верхний – своеобразная кривая подпора; средний – его можно представить в виде прямой; нижняя – кривая спада …». Судя по соотношению мощностей селевых отложений и высоты плотины, все опыты, за исключением №13, осуществлялись в условиях перелива селевой массы через гребень плотины, т.е. в начальной фазе «заиления» модели селехранилища.

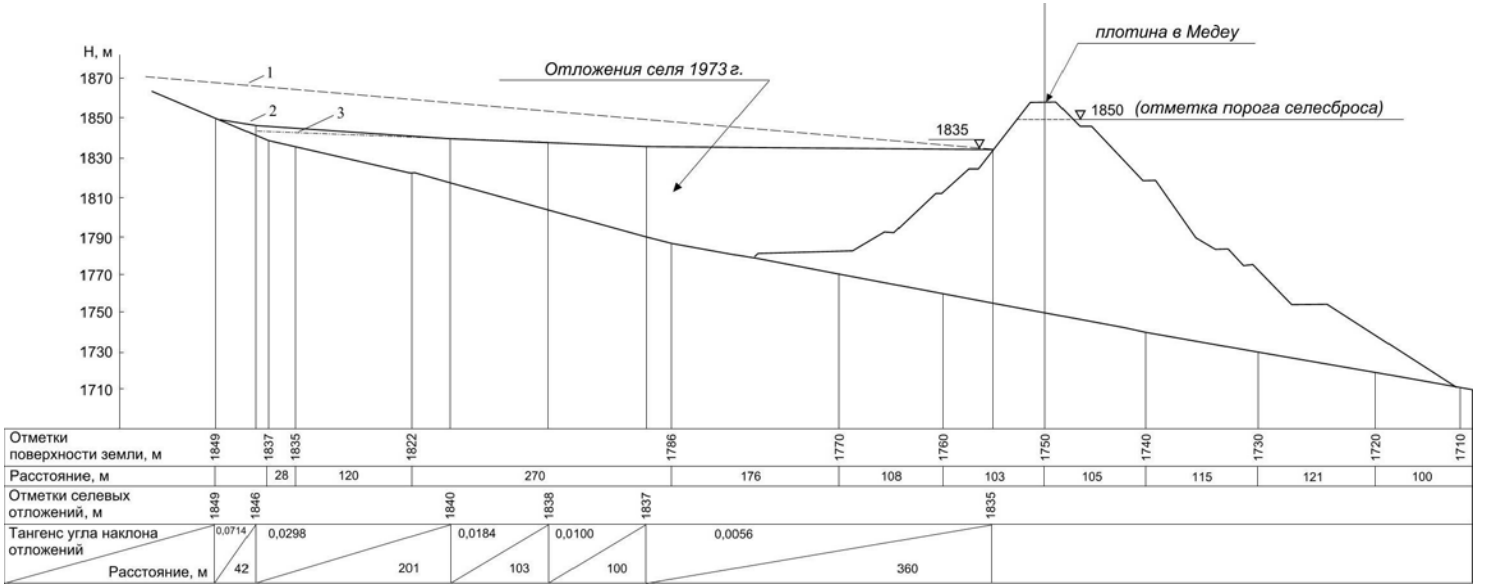


Рисунок 8.11. Селехранилище в урочище Медеу, 1973 г.
1 – положение поверхности отложений при уклоне 4 %; *2* – поверхность отложений селя 1973 г.;
3 – расчетное значение по формуле (5.19)

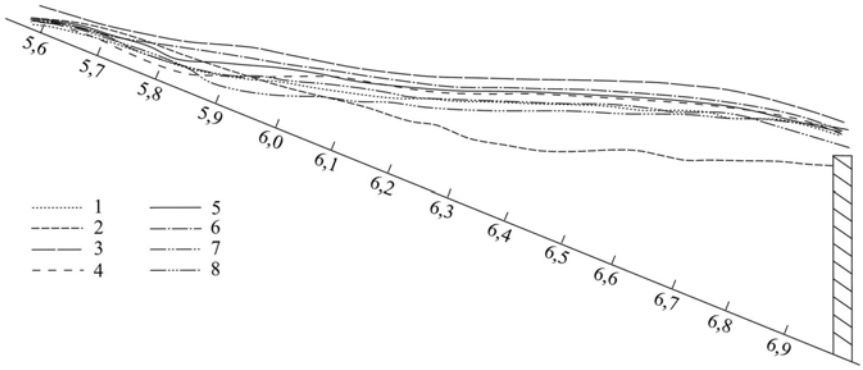


Рисунок 8.12. Профили отложений селевой массы в верхнем бьефе [221].
Номера опытов и плотность селевой массы: *1* – 2,08–2,16 т/м^3; *2* – 2,15 т/м^3; *3* – 2,08 т/м^3; *4* – 2,06 т/м^3; *5* – 2,09 т/м^3; *6* – 2,03 т/м^3; *7* – 2,02 т/м^3; *8* – 2,03 т/м^3

Этим и объясняется появление «кривой спада». Опыт №13 не сопровождался переливом селевой массы через гребень плотины, поэтому профиль отложений состоит из двух участков: верхнего, который условно может быть назван кривой подпора, и нижнего – отложений в области относительно больших глубин. Нетрудно видеть, что даже в условиях «незначительного содержания глинистых фракций» уравнительный уклон отложений в области больших глубин близок к нулю.

При определении высоты глухих селезадерживающих плотин, сооружаемых из грунтовых материалов, уравнительный уклон (согласно СНиП 2.01.15-90) принимается равным нулю. Однако такой уклон имеет место, если поверхностный слой задержанной массы представлен водой. Величина уравнительного уклона является сложной функцией расхода и объема селевого потока, физико-механических свойств селевой массы, морфометрических характеристик селехранилища и конструкции плотины и сильно влияет на расчетный объем селехранилища (рисунок 8.13).

В соответствии со СНиП 2.01.15-90 расчетный объем селехранилища W определяется по формуле

$$W = W_1 - W_2 + TW_3, \tag{8.16}$$

где W_1 – максимальный объем селя в створе плотины; W_2 – объем селя, сбрасываемый в нижний бьеф в процессе аккумуляции; T – время заиления селехранилища, принимаемое не менее 25 лет; W_3 – среднегодовой объем наносов, аккумулируемых в селехранилище.

Максимальный объем селя W_1 принимается равным:

для селей, вызываемых дождевыми и ледниково-прорывными паводками, – объему селя, вызванного прохождением паводка с вероятностью превышения 1 %;

для грязекаменных селей W_2=0, для условий Иле Алатау T – не менее 25 лет, W_3=0.

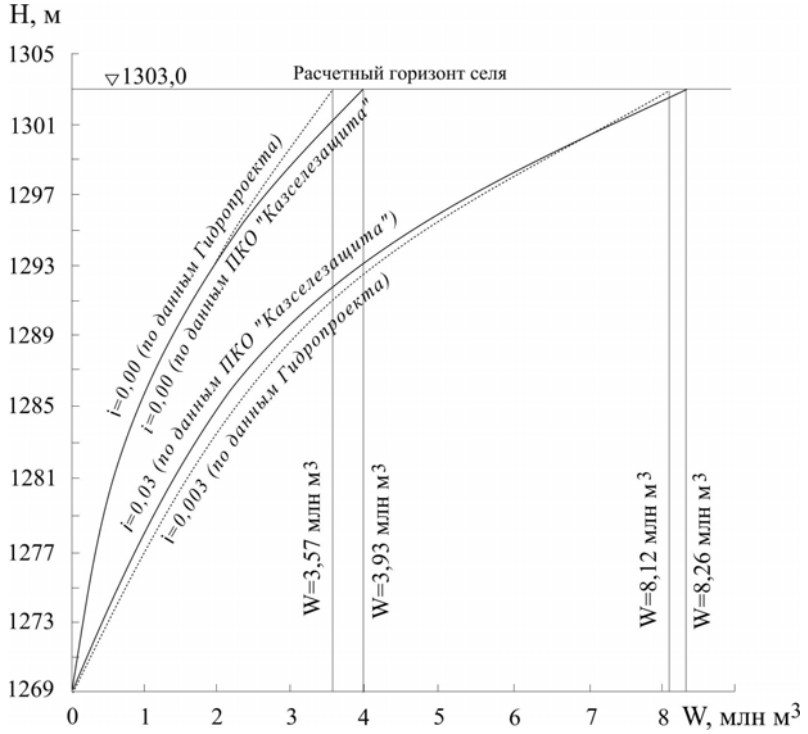


Рисунок 8.13. Объем селехранилища на р. Улькен Алматы
при различных уравнительных уклонах селевых отложений

В соответствии с пунктом 3.11 СНиП 2.01.15-90 селезадерживающие плотины, разрушение которых угрожает катастрофическими последствиями (к ним, прежде всего, относят человеческие жертвы), необходимо проверять на воздействие селя, вызванного паводком, с вероятностью превышения 0,01 %. Проектом следует предусматривать устройство поверхностных селесбросных сооружений, обеспечивающих сброс избыточного (по сравнению с расчетным) объема селевого потока, или повышение отметки гребня плотины, обеспечивающее аккумуляцию всего объема селевого потока.

В соответствии с пунктом 3.10 СНиП при определении высоты плотины, соответствующей расчетному объему селехранилища, необходимо учитывать уравнительный уклон селевых отложений, принимая его для грязекаменных селевых потоков 0,5–0,7 от уклона естественного русла. При определении высоты глухих селезадерживающих плотин из грунтовых материалов уравнительный уклон принимается равным нулю.

Различия во мнениях относительно величин уравнительных уклонов отложений селей в селехранилищах обусловлены главным образом тем, что лишь в последней четверти XX века были разработаны методы измерения и расчета основных реологических характеристик селевой массы, твердый компонент которых представлен частицами с размерами от долей микрона до 10 м и более, а их объемная концентрация приближается к

90 % [4, 40, 102–104, 129, 221–225]. Стало очевидным, что при определенных ситуациях главная роль в движении селей на малых уклонах, в остановке селей, а также в формировании уравнительного уклона при заполнении селехранилищ может принадлежать вязкопластическим свойствам селевой массы.

Математическая модель, позволяющая рассчитать уравнительный уклон отложений, формирующийся при заполнении крупных селехранилищ вязкопластическими массами, приведена в главе 5.

8.4. Искусственное увеличение предельного напряжения сдвига селевой массы

Предельное напряжение сдвига селевой массы в решающей мере определяется степенью связи ее жидкого компонента с пылевато-глинистыми фракциями твердого компонента. Одним из простейших способов увеличения предельного напряжения сдвига селевой массы является введение в ее состав глин, обладающих высокой способностью связывать воду, например Na-монтмориллонита.

При значительном (сотни тысяч, миллионы кубометров) объеме селей введение глины в состав селевой массы становится нецелесообразным из-за того, что объем глины, который необходимо хранить в пылеобразном состоянии, становится слишком большими (десятки тысяч кубометров). Гораздо больший эффект может быть достигнут при введении в селевые потоки специальных химических веществ. Наиболее известным из них является крахмал. По сообщениям печати [226], в США разработано вещество, способное связывать воду в пропорции 1:5000, причем его стоимость позволяет использовать это вещество в сельском хозяйстве для удержания влаги в почве, создания подстилки для скота и т.д. Судя по всему, использование подобных веществ для увеличения предельного напряжения сдвига селевой массы (в условиях, типичных для Иле Алатау) значительно увеличило бы рентабельность селезащитных сооружений.

Схема активного воздействия на предельное напряжение сдвига селевой массы показана на рисунке 8.14. В створе, отстоящем от плотины на расстоянии, достаточном для полного перемешивания селевой массы (в

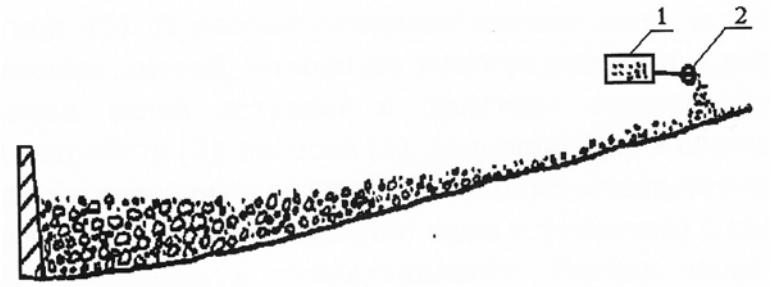


Рисунок 8.14. Схема селехранилища, включающая систему активного воздействия для увеличения уравнительного уклона. *1* – хранилище вещества, связывающего воду; *2* – система подачи и распыления связывающего вещества

процессе ее движения), сооружается комплекс, в состав которого входят хранилище вещества, связывающего воду, а также система его подачи и распыления. Распылители устанавливаются над селевым потоком на высоте, исключающей их разрушение.

В случаях, когда часть долины, расположенная выше селехранилища, не представляет хозяйственной ценности, указанный комплекс может быть удален на значительное расстояние от плотины. Это позволит уменьшить эродирующую способность селевой массы (и тем самым объем селя), а также задержать, частично, селевую массу (за счет распластывания ее по долине) еще до подхода селя к основному селехранилищу.

8.5. Искусственное уменьшение предельного напряжения сдвига селевой массы

Снижение предельного напряжения сдвига селевой массы до значений, при которых происходит ее частичный распад, значительно увеличивает затраты энергии, необходимой для перемещения твердого компонента в составе селевого потока. Это обстоятельство использовано М. С. Гагошидзе при разработке гидравлического способа борьбы со структурными селевыми потоками [227]. Суть способа заключается в принудительной закачке воды в селевые потоки с целью «... эффективной борьбы с разрушительным действием структурных селевых потоков путем искусственного перевода их в селевые паводки на путях подхода к угрожаемым объектам народного хозяйства» [151]. По мнению М. С. Гагошидзе, выпадение частиц твердого компонента приводит примерно к двукратному уменьшению расхода селя.

К недостаткам гидравлического способа следует отнести необходимость сооружения водохранилищ, практически примыкающих к селевым руслам, с объемом 0,1–0,15 от расчетного объема селехранилищ, мощных насосных установок и сооружений, обеспечивающих пропуск наносоводных селей с расходом 0,5–0,7 от максимального расхода селей большой плотности. Для условий г. Алматы емкость водохранилища составляла бы 0,5–1 млн $м^3$, необходимая пропускная способность каналов – 0,5–1,5 тыс. $м^3/с$. До настоящего времени гидравлический способ в реальных условиях не апробирован.

Более эффективно, по нашему мнению, использование гидравлического метода М. С. Гагошидзе в сочетании с селехранилищами, имеющими глухие плотины (рисунок 8.15). В рассматриваемом методе вода, используемая для разжижения селевой массы, находится непосредственно в селехранилище. При прохождении селей вступает в действие система, состоящая из водоприемных устройств *2*, насосов *3*, водоводов *4* и сливных устройств *5*. Подача воды (суспензии) в селевой поток осуществляется на расстоянии, обеспечивающем полное перемешивание воды (суспензии) с селевой массой в процессе ее движения к селехранилищу. Расход воды (суспензии) определяется расходом селя, плотностью селевой массы (с учетом минералогического и гранулометрического составов его твердого

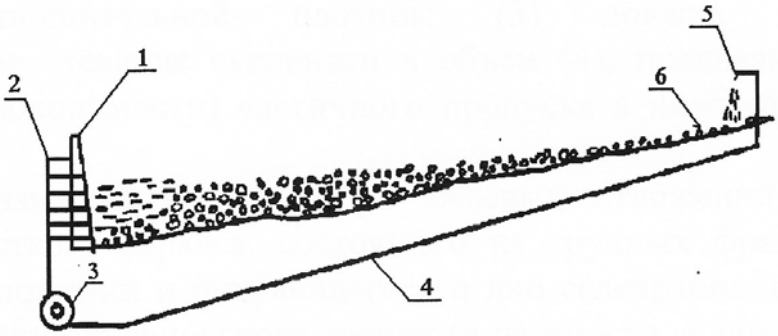


Рисунок 8.15. Схема селехранилища, включающая систему для разжижения селевой массы.
1 – плотина; *2* – водоприемник; *3* – насосы; *4* – водоводы; *5* – сливные устройства; *6* – селевая масса

компонента), характеристиками суспензии, используемой для разжижения селя. В отличие от метода М. С. Гагошидзе, по которому закачка воды в тело потока производится из нижнего полупространства, слив воды (суспензии) осуществляется с помощью устройств, расположенных существенно выше уровня потока. Благодаря этому частичная остановка селевой массы в створе подачи воды (суспензии) не приведет к закупорке водосливных отверстий. Важным моментом является отсутствие механического контакта водосливного устройства с селевым потоком.

Предлагаемый метод аккумуляции селей имеет замкнутый цикл, позволяющий многократно использовать воду (суспензию) для разжижения селевой массы и тем самым уменьшить исходный объем воды, а также исключить прохождение мощных наносоводных селей ниже створа плотины.

Механизм заполнения селехранилищ в описываемой ситуации идентичен механизму, имеющему место при заполнении селехранилищ селевой массой, твердый компонент которой переносится потоком во взвешенном состоянии за счет перемешивания.

Выбор наиболее эффективных методов селезащиты должен базироваться на результатах исследований физико-механических свойств селевой массы, характеристик селевых потоков и морфометрии русел и селехранилищ, что позволяет правильно оценить характер взаимодействия селей с инженерными сооружениями и, следовательно, их оптимизировать [227].

8.6. Комбинированная селезадерживающая плотина

Наиболее эффективным способом активного воздействия на характер уравнительного уклона селехранилищ, образуемых глухими плотинами, является частичный отвод из состава селевой массы текучего компонента с целью увеличения внутреннего трения селевых отложений [228–230]. Для этого в селехранилище сооружается дополнительная плотина, имеющая сквозную конструкцию и отсекающая часть селехранилища (рисунок 8.16).

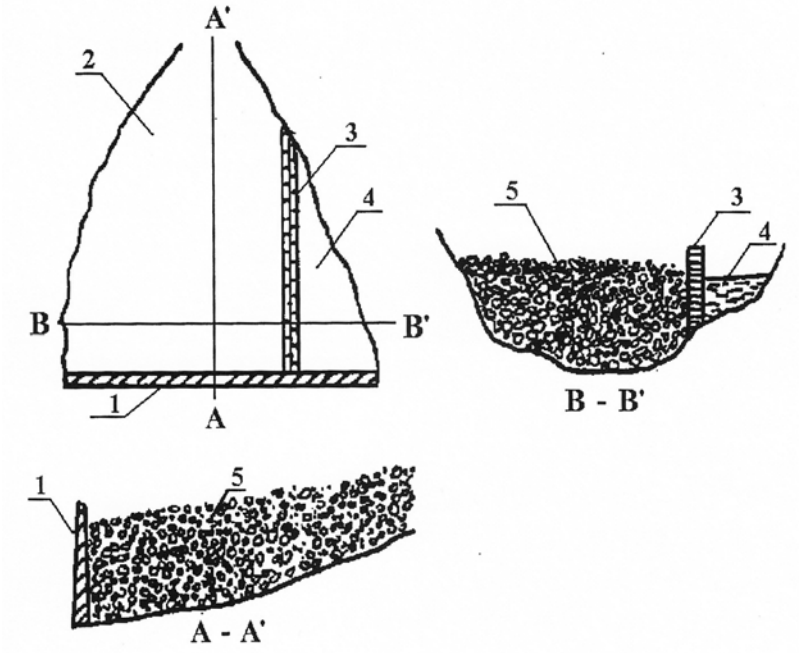


Рисунок 8.16. Комбинированная селезадерживающая плотина.
1 – глухая плотина; *2* – основное селехранилище; *3* – дополнительная плотина; *4* – дополнительный отсек селехранилища; *5* – уровень суспензии в селевых отложениях

По мере заполнения основного селехранилища *2*, вследствие частичного распада селевой массы, неизбежно оседание крупных фракций твердого компонента, сопровождающееся вытеснением суспензии в верхнюю область отложений. Сквозность дополнительной плотины *3* должна обеспечивать беспрепятственное стекание суспензии в объем *4*, предназначенный для сбора и (при необходимости) частичного пропуска в нижний бьеф глухой плотины *1*.

Отток суспензии из общей массы селевых отложений приводит к образованию жесткого каркаса, состоящего из крупных фракций твердого компонента селевых отложений и опирающегося на дно селехранилища. Благодаря резкому возрастанию кулоновского трения (в частности, за счет уменьшения архимедовой силы) угол внутреннего трения селевых отложений увеличится. Изменится и характер заполнения селехранилищ: объемная деформация селевых отложений прекратится и возрастание уровня отложений будет происходить за счет перемещения поступающей селевой массы по поверхности селевых отложений в условиях непрекращающегося оттока суспензии через сквозное сооружение.

Таким образом, заполнение селехранилища, образованного глухой плотиной, будет происходить не по фронту селехранилища, а по мере движения селя вдоль сквозного сооружения.

Соотношение между объемом основного селехранилища *2* и объемом *4*, предназначенным для сбора суспензии, зависит от минералогического и

гранулометрического составов селеформирующих пород, концентрации твердого компонента в селевой массе, и для условий селеобразования, типичных для высокогорной зоны Иле Алатау, может быть принято 1:(0,05–0,1).

Сочетание глухих и сквозных плотин значительно (на сотни процентов) увеличивает емкость селехранилищ по сравнению с глухими плотинами. В отличие от сквозных плотин исключается возможность поступления в нижний бьеф суспензии с расходом, чреватым вторичным селеформированием.

Важным достоинством предлагаемой схемы, помимо значительного уменьшения стоимости задержания единичного объема селевой массы, является возможность быстрого восстановления работоспособности селехранилищ, поскольку очистка объемов, заполненных суспензией, не представляет каких-либо трудностей.

Часть II

СЕЛЕТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ И ПРОТИВОСЕЛЕВЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

Глава 9

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ СЕЛЕВОЙ ОПАСНОСТИ

Сели природного генезиса рассматриваются как катастрофические явления, предотвратить или уменьшить ущерб от которых можно лишь учитывая опыт прошлых столетий или путем комплексных мероприятий, воздействующих как на факторы селеформирования, так и на ход селевых процессов. Ярким примером использования прошлого опыта являются аулы в ущелье Кармадон (Северный Кавказ), расположенные на склонах гор на высоте более 100 м. Благодаря этому они не пострадали от водоледяного потока (глубина которого достигала 100 м), образовавшегося в результате катастрофической подвижки ледника Колка 20 сентября 2002 г. и разрушившего жилые и производственные помещения, а также инфраструктуру в долине р. Геналдон.

Комплексный подход к защите от селей был реализован в окрестностях г. Лос-Анджелеса (Калифорния, США) и в не полной мере г. Алматы.

Рельеф горных стран – результат взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов. Выдающаяся роль селей в процессах денудации стала осознаваться только в последние десятилетия: «… Сели следует рассматривать как важнейший природный механизм перемещения рыхлых отложений в горных странах с верхних на нижние уровни накопления …» [51]. Роль селей в формировании рельефа практически не изучалась. Не случайно отложения селевых потоков на конусах выноса на большинстве инженерно-геологических карт интерпретировались и интерпретируются до настоящего времени как флювиогляциальные. По мнению геологов, эти отложения возникали в период деградации покровного и полупокровного оледенений, когда расход воды в горных реках мог значительно превышать современные значения [65].

Населенные пункты юга Казахстана (в том числе мегаполис Алматы) расположены на конусах выноса горных рек, площадь которых составляет десятки квадратных километров. Относительно ровная поверхность конусов выноса, благоприятный климат предгорья, наличие питьевой воды, плодородные почвы предопределили возникновение населенных пунктов.

Изменение представлений о роли селей в природных процессах требует ответа на вопросы: *не является ли борьба с селевыми явлениями грубым вмешательством в природные процессы, не приведет ли это к еще более тяжелым последствиям для жизни и деятельности населения?*

Известно, что основной перенос горных пород с верхнего яруса на нижний ярус накопления происходит в растворенном виде подземными и поверхностными водами, в виде взвешенных и влекомых наносов – водными потоками, рыхлообломочных пород – ледниками и в составе селевой массы – селевыми потоками.

Основным фактором, определяющим способ и масштабы переноса горных пород во времени и пространстве, является климат. Так, уже многие миллионы лет вынос рыхлообломочных пород в Антарктиде осуществляется в основном ледниками. В горных странах средних широт (с континентальным климатом), несущих в настоящее время оледенение, где накопление рыхлообломочных пород в виде морен происходило в ледниковые эпохи, основной перенос рыхлообломочных пород из высокогорья на предгорные равнины осуществляется селями. В тех горных районах, где из-за недостаточной энергии рельефа и его вертикального градиента, дефицита рыхлообломочных пород (особенно пылевато-глинистых фракций), промерзания грунта и т.д. грязекаменные сели не формируются, транспортирующим агентом являются водные потоки.

Изменение климата на протяжении плейстоцена и голоцена в средних широтах стало причиной резких колебаний селевой активности: сели с расходом и объемом, по современным оценкам относимых к катастрофическим, не формировались в ледниковые эпохи и достигали максимальных значений в межледниковые эпохи, когда температура воздуха превышала современное значение на 2–3 ºС. Увеличения селевой активности в горных районах Казахстана (несущих в настоящее время оледенение) в результате потепления климата можно ожидать уже к середине XXI века.

Суммарная продолжительность периодов, характеризовавшихся многократным увеличением селевой активности (в десятки и сотни раз по сравнению с таковой в XX веке), не превышала 1 % длительности плейстоцена. Следовательно, если в результате антропогенного вмешательства в ход естественных процессов удастся сохранить значение селевой активности на уровне XX века еще на несколько сотен (тысяч) лет, это практически не отразится на ходе естественных процессов в голоцене. Это позволяет утверждать, что борьба с селями не является грубым вмешательством в ход естественных природных селевых процессов.

Современный уровень знаний, технического и экономического развития общества позволяет оказывать существенное влияние на селевую активность лишь путем воздействия на водный фактор селеформирования. Так, активность селей гляциального генезиса достаточно просто регулируется превентивным опорожнением поверхностных водоемов моренно-ледниковых комплексов. При достаточных капиталовложениях может регулироваться и селевая активность, обусловленная прорывом подземных водоемов моренно-ледниковых комплексов. Селевая активность может быть снижена не только за счет превентивного опорожнения подземных водоемов, но и уменьшения таяния ледников, обусловленного теплом вод, поступающих в подземные водоемы, в результате трансформации подземного стока в поверхностный.

Опорожнение опасных водоемов моренно-ледниковых комплексов не вносит существенных изменений в суммарный водный баланс даже относительно небольших по площади речных бассейнов, например, таких, как бассейн р. Киши Алматы. Так, для образования озера (с объемом, равным объему озера №2 на леднике Туйыксу, прорыв которого в 1973 г. привел к

формированию катастрофического селя) достаточно в течение 20 сут отбирать воду из р. Киши Алматы с расходом, равным по величине погрешности его измерений, осуществляемых гидрологическими постами. Таким же не замеченным может оказаться и паводок, образованный грамотным опорожнением селеопасного озера.

Предотвращение селей позволяет исключить углубление русел рек и, как следствие, обрушение бортов долин, покрытых травянистой, кустарниковой и древесной растительностью, а также сохранить режим подземных вод, обеспечивающих влагой растительность, предохраняющую крутые горные склоны от эрозии и являющуюся кормом для диких и домашних животных.

Результаты анализа режима экзогенных процессов, а также фронтальных и конвективных осадков свидетельствуют о пространственно-временном совпадении активности селевых эрозионно-сдвиговых процессов и выпадении интенсивных осадков. На практике при активном воздействии на облачные процессы могут использоваться динамический и микрофизический способы [231]: общим правилом рассеяния облаков является разрушение упорядоченных вертикальных движений воздуха в облаке и околооблачном пространстве.

В межледниковые эпохи плейстоцена, в периоды максимальной селевой активности, когда уровень цивилизации не позволял адекватно противодействовать разрушительному воздействию катастрофических селей, горные долины на протяжении десятков километров на десятки и сотни лет становились бесплодными и опасными для жизни. Такая же участь постигала и конусы выноса, расположенные на предгорной равнине: на конусах выноса, прилегающих к северному склону Иле Алатау, мощность селевых отложений, только в рисс-вюрмском межледниковье составляет десятки метров, а их объем может достигать нескольких миллиардов кубометров (рисунок 9.1).

Защита от селей в таких условиях чревата не только большими затратами на противоселевые мероприятия, что может отразиться на социально-экономическом положении страны, но и опасностями, связанными с проведением превентивных мероприятий, таких, как, например, опорожнение селеопасных водоемов, активное воздействие на атмосферные осадки, задержание селей в селехранилищах, расположенных в непосредственной близости от защищаемых объектов, и т.д.

При ожидаемых масштабах потенциальной селевой активности и больших затратах на реализацию мероприятий, направленных на уменьшение ущерба от селей в XXI веке в Юго-Восточном Казахстане, разработка и своевременная реализация стратегии защиты от селей в условиях потепления климата (в которой должны быть учтены экономический, социальный и политический факторы) являются стратегически важной задачей. Успехи в ее решении в значительной мере определят степень устойчивости развития страны.

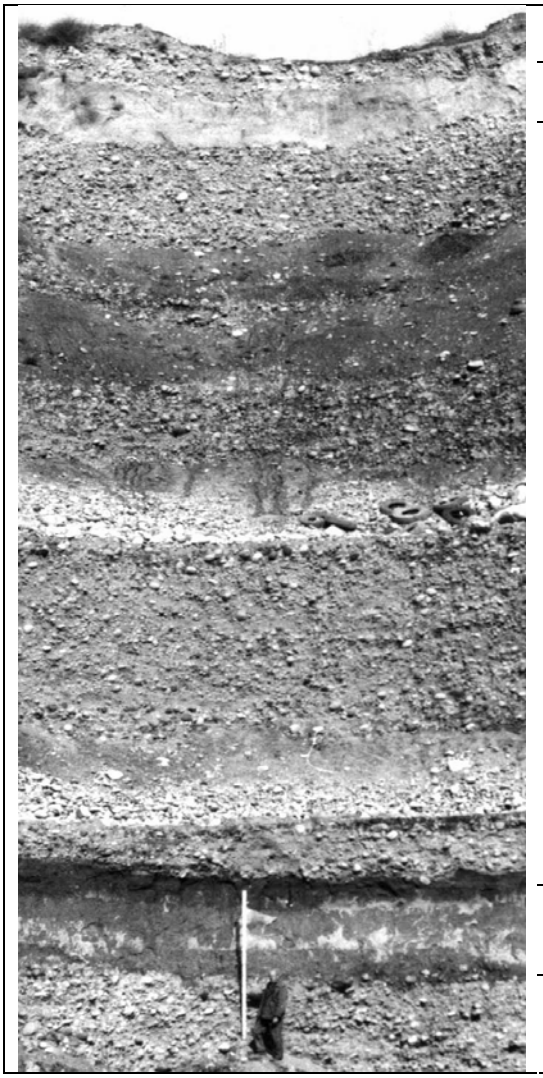


Рисунок 9.1. Стратиграфический разрез конуса выноса р. Аксай (хр. Иле Алатау)

Для Юго-Восточного Казахстана актуальны сели гляциального, дождевого, сейсмического и антропогенного генезисов. Несмотря на то, что основные факторы формирования селей (энергия рельефа и возможность ее реализации, наличие рыхлообломочных пород и воды) в качественном отношении идентичны, количественное различие может кардинально изменять их генезис и механизмы.

Важной характеристикой, используемой при решении задач, связанных с защитой от селей, является селевая активность. В терминологическом словаре «Селевые явления» [5] дается следующее определение селевой активности: «Селевая активность – интенсивность развития селевого процесса во времени и в пространстве». Существуют и другие определения селевой активности.

Одна из первых классификаций селевой активности принадлежит П. С. Непорожнему [232]. В качестве показателя «потенциальной селеопасности», что может толковаться и как селевая активность, он предложил использовать количество наносов, поступающих в среднем за один сель с 1 км^2 площади бассейна.

Б. В. Поляков (1935 г.) оценивал селевую активность (селеносность) бассейна по степени размываемости водосборной поверхности. Степень размываемости он характеризовал коэффициентом размываемости, значения которого изменялись от 1–2 для слаборазмываемых до 6–8 для сильноразмываемых.

И. И. Херхеулидзе (1947 г.) ввел понятие коэффициента селеносности, под которым понималось отношение количества наносов, выносимых с 1 км^2, к количеству наносов, выносимых из бассейна средней селевой активности. Бассейн р. Киши Алматы с коэффициентом селеносности 1,0–1,5 И. И. Херхеулидзе отнес к сильно селеносным. Слабо селеносным бассейнам присваивался коэффициент 0,5–0,7. Позже И. И. Херхеулидзе дополнил эту классификацию критерием, учитывающим степень эродированности селевых бассейнов.

С. Г. Рустамов (1956 г.) классифицировал селевые бассейны по частоте возникновения селей:

повышенная селевая активность – сели проходят не реже одного раза в 2–3 года;

средняя селевая активность – один раз в 3–5 лет;

слабая селевая активность – один раз в 5–10 лет.

Он же предлагал классифицировать селевые бассейны по объему твердого материала, выносимого одним селем.

Д. Л. Соколовский (1957 г.) предлагал установить связь количества наносов с 1 км^2 с высотными зонами селевых бассейнов:

15 000–25 000 м^3 – истоки селевого питания расположены выше 2500–3000 м над уровнем моря;

5000–15 000 м^3 – истоки питания 1000–2500 м над уровнем моря;

менее 5000 м^3 – истоки питания ниже 1000 м над уровнем моря.

В приведенных классификациях акцент сделан на одном из признаков (высотное расположение области формирования селей, объем селя, вынос наносов с 1 км^2 площади селевого бассейна, повторяемость селепроявлений в бассейне и т.д). С. М. Флейшман (1948 г.) предложил классификацию, учитывающую, по его мнению, основные признаки селеопасности селевого бассейна (таблица 9.1): повторяемость, объем селевых выносов одним селевым потоком определенной повторяемости, удельный расход селя на 1 м его ширины с учетом структуры селевой массы, разрушительное действие потока.

С. М. Флейшман предложил и следующую дифференциацию селеопасных бассейнов:

исключительно селеопасный – суммарный объем выносов за 100 лет – 1–10 млн м^3 и более;

весьма селеопасный – 100 000–1000 000 м^3;

Таблица 9.1. Классификация селевых бассейнов по С. М. Флейшману

Категория селеопасности	Максимальные показатели селя 1% повторяемости		Воздействие потока на сооружения
	Объем, тыс. $м^3$	Удельный расход на 1 м ширины потока, $м^3/с$	
I	До 50	До 5/31*	Небольшие размывы, частичные забивки отверстий водопропускных сооружений
	50-100	До 4/2,5	
	100-200	До 3/2	
II	50-100	5-7/3-5	Сильные размывы, полная забивка отверстий, повреждение и снос бесфундаментных строений
	100-200	4-6/2,5-4	
	200-300	3-5/2-3,5	
III	100-400	7-9/5-7	Большая разрушительная сила: снос мостовых ферм, разрушение устоев мостов, каменных строений, дорог
	200-600	6-8/4-6	
	300-800	5-7/3,5-5	
IV	400	9/7	Катастрофические сели: разрушение целых селений, участков дорог вместе с полотном и сооружениями, погребение сооружений под наносами
	600	8/6	
	800 и более	7/5	

* В числителе даны значения для водно-каменных и других несвязных селей, в знаменателе – для связных грязевых и густых грязекаменных селей.

среднеселеопасный – 10 000–100 000 $м^3$;

слабоселеопасный – 1000–10 000 $м^3$.

Классификация С. Г. Рустамова (1956 г.) [233], основанная на учете повторяемости селей, также зависит от природы селеформирования. Скорее всего, она может быть использована при оценке селевой активности бассейнов, где сели в основном образуются в ходе выпадения интенсивных дождей. Классификация этого же автора, основанная на информации об объеме твердого материала, выносимого одним селем, без указания повторяемости селевых явлений мало информативна.

Наибольшую ценность, по-видимому, представляет классификация С. М. Флейшмана, приведенная в таблице 9.1, позволяющая «оценить возможную селевую потенцию бассейна» [53]. С. М. Флейшман считал, что жизненного опыта одного-двух поколений, с учетом дендрохронологического и других методов определения объема селей за сто лет, достаточно для определения приведенной селевой активности (под приведенной селевой активностью понимается частное от деления суммарного объема селевых выносов за 50–100 лет на число лет, образующих отрезок учтенного времени [5]). Такая рекомендация приемлема для общегеографического описания районов, подверженных воздействию селей в условиях стабильного климата. Однако использовать ее в условиях изменяющегося глобального климата вряд ли допустимо.

К одной из первых попыток придания количественных характеристик факторам, определяющим степень «селеносности» бассейнов горных рек Иле Алатау, можно отнести работу И. П. Смирнова и А. С. Деговца [234]. По их мнению, к факторам, определяющим степень селеносности, относятся форма и степень эродированности бассейна, крутизна склонов, уклон русла, наличие растительности, степень оледенения, удельная селеактивность, количество селей на единицу площади бассейна.

Крутизна склонов и уклон русла характеризовались средними значениями синусов углов наклона; степень эродированности – отношением селеактивной площади (не закрепленная растительностью овражно-балочная и речная сеть, различные размывы, осыпи, оплывины и оползни); форма бассейна – отношением площади стокообразования к квадрату длины водотока; влияние растительности – отношением площади, занятой лесом, к площади стокообразования; степень оледенения – отношением площади оледенения к площади стокообразования; повторяемость селей – один раз в число лет.

В работе А. С. Деговца и Г. А. Токмагамбетова [235] степень селеопасности бассейна определялась коэффициентом селеносности K_s

$$K_s = I + i + \Phi + f_o + \mu + S_a + n, \qquad (9.1)$$

где I – средний уклон бассейна; i – средний уклон русла; Φ – форма бассейна; f_o – степень оледенения; μ – степень эродированности; S_a – удельная селеактивность; n – количество селей на единицу площади бассейна.

Количественные показатели степени селеопасности бассейнов рек Иле Алатау приведены в таблице 9.2 [235].

По коэффициентам селеопасности селевые бассейны Иле Алатау разделены на четыре категории:

1. Весьма селеопасные ($K_s \geq 1{,}6$). К ним относятся бассейны рек Киши и Улькен Алматы, Аксай и Есик.

2. Сильноселеопасные ($1{,}6 > K_s \geq 1{,}4$). Бассейн р. Талгар.

3. Среднеселеопасные ($1{,}4 > K_s \geq 1{,}1$). Бассейны рек Шамалган, Каскелен и Узынкаргалы.

4. Слабоселеопасные ($1{,}1 > K_s$). Бассейны рек Шелек и Турген.

Оценить, насколько данные, приведенные в цитируемой статье, могут быть использованы при проектировании противоселевых сооружений и других защитных мероприятий, трудно, хотя бы потому, что используемые в ней термины отличаются по смыслу от понятий, заложенных в основу терминологического словаря «Селевые явления» [5], изданного в 1996 г. Так, степень селевой опасности по словарю «… целесообразно проводить на основе двух показателей – степени селевой активности и степени освоенности территории или значимости объектов, расположенных в зоне возможной селевой угрозы в стоимостном выражении». Для оценки селевой активности «… используют показатели повторяемости и объем селевых выносов» [5].

Таблица 9.2. Количественные показатели степени селеопасности бассейнов рек Иле Алатау (по А. С. Деговцу и Г. А. Токмагамбетову)

Река	Количественные показатели селеопасности бассейнов										
	Средний уклон бассейна I	Средний уклон русла i	Форма бассейна Φ	Лесистость fl	Степень оледенения fo	Степень эродированности μ	Селеактивность бассейна Sa	Количество селей на 1 км^2 бассейна n	Повторение селей 1 раз в число лет	Коэффициент селеопасности Ks	Степень селеопасности реки
Узынкаргалы	0,345	0,075	0,47	0	0,04	0,32	0,02	0,02	16	1,3	Среднеселеопасная
Шамалган	0,382	0,105	0,19	0	0,02	0,26	0,03	0,09	11	1,1	«
Каскелен	0,400	0,077	0,19	0,5	0,04	0,31	0,04	0,06	9	1,1	«
Аксай	0,429	0,116	0,33	0,10	0,11	0,20	0,21	0,49	1,5	1,9	Весьма селеопасная
Улькен Алматы	0,620	0,091	0,43	0,12	0,14	0,37	0,34	0,55	0,9	2,5	«
Киши Алматы	0,533	0,122	0,33	0,10	0,10	0,27	0,15	0,54	0,22	2,1	«
Талгар	0,466	0,074	0,11	0,10	0,26	0,21	0,14	0,14	2	1,4	Сильноселеопасная
Есик	0,422	0,103	0,48	0,14	0,21	0,28	0,04	0,06	9	1,6	Весьма селеопасная
Турген	0,303	0,064	0,30	0,05	0,03	0,20	0,01	0,01	24	0,9	Слабо селеопасная
Шелек	0,310	0,039	0,13	0	0,04	0,34	0,01	0,002	13	0,8	«

Данные, приведенные в работе А. С. Деговца и Г. А. Токмагамбетова [235], вызывают сомнения в достоверности оценки «степени селеопасности» селевых бассейнов Иле Алатау. Согласно данным таблицы 9.2, степень селеопасности бассейна р. Аксай выше, чем бассейна р. Талгар, хотя площадь последнего в 3,6 раза, годовой сток в 1,2 раза и площадь оледенения в 7,5 раза больше соответствующих характеристик бассейна р. Аксай (таблица 9.3).

Низкая оценка степени селеопасности бассейна р. Талгар (см. таблицу 9.2) обусловлена, прежде всего, относительно малым значением количества селей на 1 км^2 площади бассейна. Но ведь подавляющее число селей бассейна р. Аксай – малые по объему и расходу сели, формирующиеся в

Таблица 9.3. Характеристики речных бассейнов северного склона Иле Алатау

Река	Площадь бассейна, км^2	Годовой слой стока, мм	Площадь оледенения, км^2	Сумма площадей крупных ледников, км^2
Каракастек	212	221	–	–
Узынкаргалы	388	320	12,3	11,5
Шамалган	139	292	2,1	1,0
Каскелен	300	436	12,3	10,4
Аксай	124	617	15,6	14,5
Улькен Алматы	256	558	31,5	27,6
Киши Алматы	107	614	11,4	9,4
Талгар	444	742	117,1	110,5
Есик	293	609	53,0	49,4
Турген	583	363	39,5	36,8

селевом очаге Акжар и отлагающиеся в горной долине, не приносят существенного ущерба. Высокая оценка степени селеопасности бассейна р. Улькен Алматы – результат учета еще более малых по масштабу селей селевого очага Малютинский.

Степень селеопасности бассейна, по А. С. Деговцу и Г. А. Токмагамбетову [235], определяется суммой безразмерных коэффициентов, характеризующих различные по физическому смыслу факторы селеформирования. Характеристика факторов безразмерными коэффициентами удобна, однако требует придания каждому слагаемому коэффициента, характеризующего степень влияния каждого фактора на процесс селеформирования – его «вес». Согласно формуле (9.1) влияние всех семи факторов одинаково, что практически невероятно. Использование безразмерных коэффициентов при оценке степени селеопасности не позволяет получать и абсолютное ее значение. Так, одна и та же «степень селеопасности» может быть получена для селевых бассейнов, площади которых многократно отличаются, если значения слагаемых остаются неизменными.

Результаты изучения геологии и геоморфологии конусов выноса основных рек северного склона Иле Алатау [66, 67] свидетельствуют о том, что более 90 % их объема представлены селевыми отложениями. Изучение строения конусов выноса показало, что гранулометрический состав селевых отложений остается неизменным, как минимум, до средней части конуса выноса. Затем относительное содержание крупных фракций постепенно уменьшается, хотя даже в периферийной зоне встречаются отложения, мало отличающиеся от отложений в верхней части конуса выноса. Объясняется этот феномен отложением наиболее крупных селей либо тем, что селевая масса обладала повышенным предельным напряжением сдвига, препятствовавшим растеканию селевого потока по мере его продвижения по конусу выноса. Сказанное позволяет утверждать, что подавляющая часть селевой массы отлагается на конусе выноса и характеризует селевую активность речного бассейна.

Следовательно, объем конусов выноса характеризует селевую активность речных бассейнов северного склона Иле Алатау. Подтверждением тому является высокий коэффициент корреляции между объемом конусов выноса и площадью речных бассейнов (площадью водосборов – основного источника жидкого компонента селей дождевого генезиса), равный 0,78; объемом конусов выноса и площадью оледенения речных бассейнов (основного механизма формирования твердого и жидкого компонентов селей гляциального генезиса), равный 0,77. В таблице 9.4 приведены данные о продольном уклоне, площади и объеме конусов выноса основных рек северного склона Иле Алатау.

Таблица 9.4. Объем и некоторые другие морфометрические характеристики конусов выноса рек северного склона Иле Алатау

Река	Площадь конуса выноса, км^2	Объем конуса выноса, км^3	Уклон конуса выноса, ‰
Каракастек	52,9	0,8	21,4
Узынкаргалы	124,6	4,93	20,4
Шамалган	12,2	0,35	41,5
Каскелен	25,1	1,16	31,7
Аксай	39,6	1,32	34,0
Улькен Алматы	71,6	7,58	33,8
Киши Алматы	41,5	2,55	36,7
Талгар	175,9	10,3	29,6
Есик	162,0	9,5	29,6
Турген	176,0	11,4	23,3

Из таблицы 9.4 следует, что объем конуса выноса р. Есик близок к объему конуса выноса р. Талгар, хотя площадь бассейна и площадь оледенения р. Талгар существенно больше. Причиной этого несоответствия является относительно более высокая сейсмичность, имевшая место в прошлом в бассейне р. Есик.

Состояние скальных откосов определяется многими факторами, что делает невозможным длительную устойчивость крутых склонов в трещиноватых скальных породах, если наклон склона превышает естественный угол откоса. Выравнивание склона контролируется трещиноватостью, поэтому конечная форма склона зависит от ориентировки преобладающих систем трещин. Степень влияния сейсмичности на селевую активность может характеризоваться коэффициентом «трещиноватости», определяемым отношением длины разломов, приходящихся на единичную площадь речного бассейна.

Коэффициент «трещиноватости» для различных бассейнов рек Иле Алатау находился на основе данных о тектонических разломах, приведенных в «Схеме новейшей тектоники Алма-Атинского сейсмоактивного района», составленной Н. М. Чабдаровым. Значения этих коэффициентов приведены в таблице 9.5.

Таблица 9.5. Коэффициенты «трещиноватости» бассейнов рек северного склона Иле Алатау

Бассейн реки	Коэффициент «трещиноватости»
Есик	0,063
Талгар	0,036
Киши Алматы	0,037
Улькен Алматы	0,031
Аксай	0,032
Каскелен	0,02
Шамалган	0,039
Узынкаргалы	0,028

Сопоставляя данные, приведенные в таблицах 9.4 и 9.5, нетрудно видеть, что практическое равенство объема конусов выноса рек Есик и Талгар хорошо согласуется со значениями коэффициента «трещиноватости», площади бассейнов и их оледенения. То же можно сказать и об объеме конуса выноса р. Каскелен. Его малое значение хорошо согласуется с относительно слабым проявлением тектоники Иле Алатау на территории бассейна р. Каскелен, а также влиянием образования верхней предгорной ступени в середине плейстоцена [65].

Результаты анализа процессов выветривания коренных пород, слагающих центральную часть хребта Иле Алатау, и переноса его продуктов в высокогорной зоне показали, что главная роль в генерации наносов принадлежит экзарации. Их перенос также осуществляется ледниками. Основная масса наносов в высокогорной зоне концентрируется в конечных моренах. Следовательно, определение объема наносов, накопившихся в виде морен в том или ином речном бассейне северного склона Иле Алатау, позволяет оценить объем рыхлообломочных пород, который в ходе глобального потепления может быть вынесен на конусы выноса. Наиболее достоверные данные о селевой активности на северном склоне Иле Алатау получены за последние 150 тыс. лет.

Известно, что селевые явления возникают при синхронной реализации трех факторов: геологического, геоморфологического и гидрометеорологического. История развития северного склона Иле Алатау, где сели являются основным механизмом переноса наносов из высокогорной зоны на конусы выноса, расположенные на предгорной равнине, свидетельствует о том, что селевая активность в плейстоцене резко изменялась. Максимума она достигла, скорее всего, в рисс-вюрмское межледниковье и была практически нулевой в ледниковые эпохи.

Прекращение селевой деятельности в ледниковые периоды объясняется многократным сокращением стокообразующей площади водосборов, где ливневые осадки выпадают в жидком виде, уменьшением энергии рельефа, так как вся высокогорная область, покрытая снегом и льдом, не могла быть местом зарождения и развития селей. Значительно уменьшились в этот период времени и потенциальные возможности геологического фактора – мощность рыхлообломочных отложений в средней и низкогорной зонах существенно меньше, чем в высокогорной зоне. Максимума селевая актив-

ность достигала в периоды, когда во всех высотных зонах хребта ливневые осадки выпадали в виде дождей. Это происходило на юге Казахстана, когда температура воздуха в Антарктиде превышала современное значение на 2–3 °С.

Селевая активность в голоцене (последние 10–12 тыс. лет), даже в период его климатического оптимума, была ниже селевой активности второй половины XX века. Сохранившийся лёссовый покров на большей части поверхности конусов выноса рек Улькен и Киши Алматы является тому доказательством.

В 1999–2000 гг. была дана оценка объема наносов, отложившихся на конусах выноса рек Улькен и Киши Алматы в голоцене [236]. Это отложения, частично перекрывающие лёссовый покров, образовавшийся в вюрмскую ледниковую эпоху и, следовательно, имеющие возраст, не превышающий 10–12 тыс. лет.

Лёссовый покров перекрывает селевые и аллювиальные отложения, образовавшиеся в рисс-вюрмском межледниковье. По возможности измерялась мощность лёсса. Поскольку поверхность рисс-вюрмских отложений из-за наличия камней, гальки и т.д. была неровной, погрешность измерения мощности лёссового покрова составляла ±0,1 м. Там, где измерить мощность лёсса было невозможно из-за недостаточной глубины выемки, давалась ее минимальная оценка. Данные о расположении точек, где определялись мощности наносов, расположенных на поверхности лёссовидных пород, а также мощности лёссового покрова нанесены на схему конусов выноса рек Улькен и Киши Алматы (рисунок 9.2).

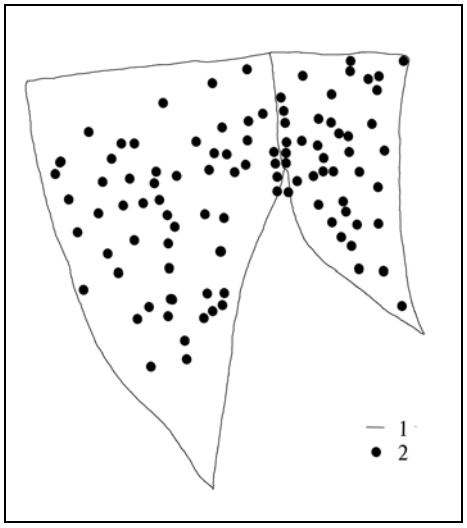


Рисунок 9.2. Схема расположения точек, где определялась мощность лёсса, селевых и аллювиальных отложений на конусах выноса рек Улькен и Киши Алматы (слева и справа соответственно). *1* – граница конуса выноса; *2* – место оценки мощности отложений

Результаты этой оценки оказались неожиданными: большая часть площади конусов выноса (более 80 %) перекрыта лёссом, мощность которого изменяется от десятых долей метра до 11 м (район метеостанции «Алматы ОГМО»). Мощность селевых отложений, перекрывающих лёсс на незначительной части площади конусов выноса, изменяется от долей метра до 1,2 м.

Результаты обработки описанных наблюдений с большой степенью достоверности позволяют утверждать, что объем селевых отложений голоцена на конусе выноса р. Киши Алматы не превышает 3 млн м^3, а на конусе выноса р. Улькен Алматы – 4 млн м^3. Относительно малая селевая активность бассейна р. Улькен Алматы (его площадь превышает площадь бассейна р. Киши Алматы более чем в 2 раза) объясняется низкой селевой активностью частного бассейна р. Проходная и перехватом твердого стока из частного бассейна р. Озерная озером Улькен Алматы, служащим на протяжении 20–25 тыс. лет естественным селехранилищем [61]. Имеющаяся информация свидетельствует о том, что выносы селей на конусы выноса других рек северного склона Иле Алатау в голоцене были также очень незначительными.

Если сравнить объем селевых отложений в голоцене на конусе выноса р. Киши Алматы с объемом селевых отложений в рисс-вюрмское межледниковье, составившим 1,0–1,2 млрд м^3 [236], нетрудно прийти к выводу, что селевая активность в голоцене крайне незначительно отразилась на морфометрических характеристиках конусов выноса, расположенных на предгорной равнине.

Вывод об относительно низкой селевой активности на северном склоне Иле Алатау в голоцене подтверждается и хорошей сохранностью вюрмской морены в долине р. Киши Алматы, которая заканчивается на высоте 2500–2600 м, а также морен этого же возраста в других долинах хребта. Большинство селевых врезов на этих моренах образовалось в XX веке.

Об очень низкой селевой активности на северном склоне Иле Алатау в последнем тысячелетии свидетельствуют и результаты изучения ленточных глин, оказавшихся на поверхности после опорожнения озера Есик в 1963 г. Сели, сравнимые с селями 1958 и 1963 гг., в бассейне р. Есик не формировались по меньшей мере 300 лет [237], а по данным Е. М. Калмынкиной и А. П. Горбунова – 700 лет [238].

Очень низкая относительная селевая активность на северном склоне Иле Алатау в голоцене до сих пор остается загадкой, поскольку в климате голоцена имеется интервал, известный как климатический оптимум, продолжавшийся более 2 тыс. лет. В этот период средняя температура воздуха в Антарктиде превышала современное значение примерно на 1 ºС, ледяной покров Северного Ледовитого океана сократился по площади почти вдвое, Исландию наполовину покрывали березовые леса (их площади сейчас занимают менее 1 %). «По существующим оценкам, в Европе было теплее на 2 ºС …» [239]. Близкая к современной была и температура воздуха 4–5 тыс. лет назад [76]. Если на юге Казахстана температура воздуха в период климатического оптимума голоцена увеличивалась так же, как в Европе, это должно было приводить к практически полной дегляциации хребтов Западного и Северного Тянь-Шаня и, следовательно, не только к активизации селей гляциального, но и резкой активизации селей дождевого генезиса. По данным [237], это несоответствие может быть объяснено тем, что стадийные морены вюрма сыграли роль естественных плотин, аккумулировавших сели голоцена, формировавшиеся в высокогорной зоне.

Эта гипотеза подтверждается и данными геофизических наблюдений на леднике Туйыксу, проводившихся в период Международного геофизического года. В частности, под ледником Туйыксу были обнаружены рыхлообломочные отложения мощностью около 100 м. Эти отложения не могли образоваться в вюрме, так как в эпохи оледенений в результате корразии происходит углубление долин. Это хорошо видно на примере верхней трети долины р. Киши Алматы, где в результате углубления основной долины образовались висячие долины.

Однако гипотеза об активизации селей в климатическом оптимуме голоцена не подтверждается геоморфологическим строением висячих долин бассейна р. Киши Алматы, свидетельствующим о незначительной селевой деятельности в этих долинах в голоцене. На возможность низкой селевой активности в этот период времени на северном склоне Иле Алатау указывают и последние результаты исследования климата оптимума голоцена на территории Северной Евразии, согласно которым отклонение средних температур июля от современных значений в Тянь-Шаньском регионе могло иметь даже отрицательные значения [240].

Практически полное отсутствие исторических данных о селевой активности в Тянь-Шаньском регионе и «младенческий» возраст науки о селях в конце XIX – начале XX века стали причиной сверхнизкой оценки селевой активности на северном склоне Иле Алатау. Неправильная оценка плотности селевой массы селя, разрушившего восточную часть г. Верного, привела к тому, что утвердилось мнение, согласно которому дождевые сели, близкие по масштабам селю 1921 г., формируются один раз в 10 000 лет. И только катастрофические гляциальные сели 1958 и 1963 гг. в бассейне р. Есик способствовали ускорению проектирования и строительства селехранилища в урочище Медеу. Сели 1973 г. (бассейн р. Киши Алматы) и 1977 г. (бассейн р. Улькен Алматы) рассеяли миф о редкой повторяемости селей на северном склоне Иле Алатау: в последующие годы были сооружены селехранилища на реках Есик, Улькен Алматы, Каскелен, Узынкаргалы, Каргалинка и Талгар. Однако, если емкости селехранилищ на реках Киши и Улькен Алматы с большой степенью вероятности достаточны для задержания одного крупного селя, то этого нельзя сказать о других селехранилищах. В особой мере это относится к селехранилищам на реках Каскелен и Узынкаргалы.

Объясняется это, прежде всего, неправильностью оценки селевой активности упомянутых речных бассейнов, остаточным принципом финансирования строительства селезащитных сооружений, унаследованном независимым Казахстаном от СССР, ошибочными представлениями об особенностях задержания селевой массы сквозными сооружениями, морально устаревшими еще к моменту своего утверждения Инструкцией по проектированию и строительству противоселевых защитных сооружений (СН 518-79) и последовавшими за ней нормативными документами. О необходимости создания нормативных документов, отвечающих современному состоянию знаний о селях и методах защиты от селей, говорят и пишут уже более 30 лет на съездах и конференциях не только научные работники, но и

ответственные работники проектных и строительных организаций, представители подразделений МЧС РК.

Несколько примеров из нормативных документов.

«При определении высоты плотины, соответствующей расчетному объему селехранилища, необходимо учитывать уравнительный уклон селевых отложений $tg\alpha_y$, принимая его для селевых потоков, равным $tg\alpha_y=0,5tg\alpha$, где $tg\alpha$ – уклон естественного русла. При определении высоты глухих селезадерживающих плотин из грунтовых материалов уравнительный уклон отложений принимается равным нулю». Определение уравнительного уклона позволяет судить, при каком уровне селевой массы в створе плотины начнется перелив селевой массы через гребень плотины и, следовательно, какова емкость селехранилища. Уровень перелива не зависит от материала, из которого изготовлена плотина, а емкость селехранилища (в случае грязекаменных селей большой плотности) в решающей мере определяется уравнительным уклоном!

«… Селезадерживающие плотины, разрушение которых угрожает катастрофическими последствиями, необходимо проверять на воздействие селевого потока, вызванного паводком с вероятностью превышения 0,01 %. При этом проектом следует предусматривать устройство поверхностных селесбросных сооружений, обеспечивающих сброс избыточного (по сравнению с расчетным) объема селевого потока, или повышение отметки гребня плотины, обеспечивающее аккумуляцию всего объема селевого потока ...». Как определяется «избыточный (по сравнению с расчетным) объем селевого потока? Каков расход «избыточного объема»?

«… Проектом селезадерживающих сооружений следует предусматривать возможность восстановления объема селехранилища после его заполнения путем наращивания плотины или очистки селехранилища ...» Насколько допустимо наращивать плотину? Этот вопрос должен решаться одновременно с проектированием селехранилища, так как именно он может определять место возведения плотины.

Если восстановление объема селехранилища возможно только путем его расчистки, необходимо, чтобы это обстоятельство являлось составной частью проекта, так как именно технология, стоимость транспортировки и складирования селевой массы должны лежать в основе технико-экономического обоснования сооружения плотины (селехранилища).

Многие принципиально важные вопросы (в том числе расчеты максимального расхода и объема) проектировщикам предлагается решать с помощью «региональных методик и изысканий», хотя на современном уровне знаний сели не имеют национальной и территориальной принадлежности.

Никаких инструкций, наставлений или норм и правил (утвержденных на государственном уровне) проведения работ по превентивному опорожнению селеопасных водоемов в высокогорной зоне не существует. Практически всем опорожнениям не предшествовало проведение научно-исследовательских и проектных работ. Негативные последствия таких опорожнений общеизвестны.

Глава 10

ПРЕВЕНТИВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

10.1. Мероприятия, обеспечивающие минимизацию потерь от селей

Важную роль в оптимизации мер, направленных на предотвращение образования селей и уменьшение ущерба, наносимого ими, могут играть превентивные мероприятия, которым до настоящего времени не уделяется должного внимания. По данным ГУ «Казселезащита», на проведение превентивных мероприятий расходуется лишь около 5 % средств, выделяемых государством на защиту от селей [22].

Наиболее экономически эффективным способом защиты от селей, зарождающихся в высокогорной зоне, является предотвращение возникновения и развития озер на моренно-ледниковых комплексах, их превентивное опорожнение, а также мелиорация очагов зарождения селей дождевого генезиса (рисунок 10.1).

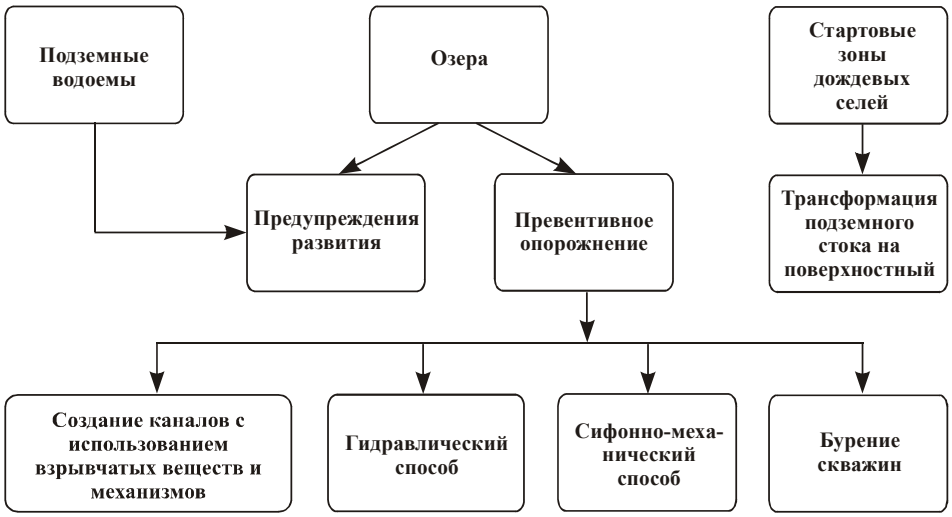


Рисунок 10.1. Превентивные противоселевые мероприятия в высокогорной зоне

При благоприятном геоморфологическом строении горных долин в высокогорной зоне могут быть созданы водохранилища, которые способны аккумулировать паводковые воды, тем самым предотвращая сели.

Характеристики селей, зарождающихся в высокогорье, могут значительно возрастать за счет вовлечения в процесс селеформирования паводковых вод, формирующихся при ливневых жидких осадках на водосборах среднегорья. Уменьшения быстрого стока в этой зоне можно добиться

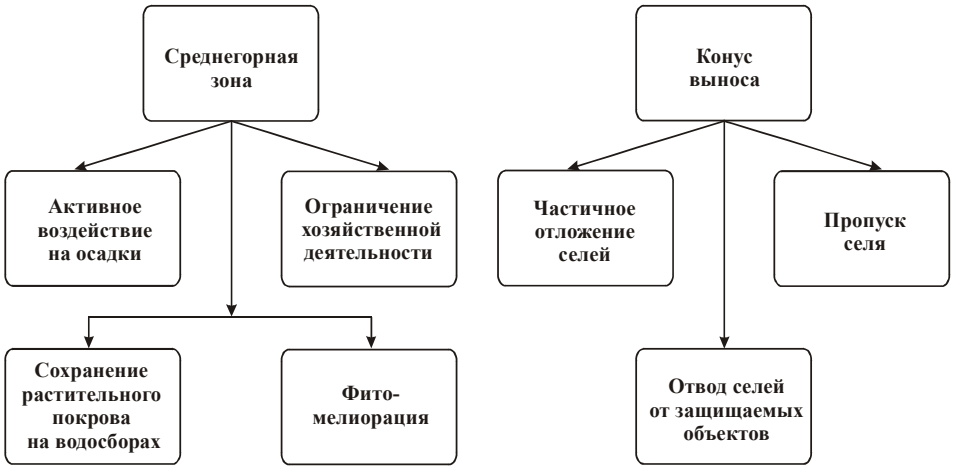


Рисунок 10.2. Превентивные мероприятия в среднегорной зоне и на конусе выноса

путем проведения превентивных мероприятий. Если задержание селей в селехранилищах среднегорной и низкогорной зон признается нецелесообразным, уменьшение ущерба достигается путем управления движением и отложением селей на территории конусов выноса (рисунок 10.2).

Защита от селей дождевого генезиса, формирующихся в очагах рассредоточенного селеобразования, может осуществляться путем воздействия на процесс выпадения осадков: интенсивность и продолжительность осадков должны регулироваться таким образом, чтобы их выпадение не приводило к формированию селей, с одной стороны, и к дефициту увлажнения грунтов, поверхностного и подземного стоков – с другой.

Активное воздействие на осадки, приводящие к катастрофическому селеформированию, станет возможным лишь тогда, когда будут разработаны надежные методы прогнозировании осадков во времени и пространстве, а также методы «точечного» воздействия на ход осадков. В противном случае может быть нарушено экологическое равновесие на горных склонах, последствием которого станет превращение их в бедленды и недопустимое изменение режима горного стока, обеспечивающего жизнь и деятельность на предгорной равнине.

10.2. Метод предотвращения селей дождевого генезиса

В качестве превентивной меры борьбы с зарождением селей на моренах и склоновых отложениях предлагается создание в рытвинах, «готовых» к селеобразованию, своеобразных «окон разгрузки». Эти окна вскрывают каналы стока, уменьшают давление в пласте и переводят подземный сток в поверхностный, предотвращая обводнение грунтовых массивов. Поиски подземных каналов стока могут вестись с помощью технических средств. Хорошо себя зарекомендовал сейсморасходомер, использовавшийся при поиске каналов стока в теле морены ледника Маншук Маметовой, а также

в работах В. А. Голубовича на моренах ледника Туйыксу [241]. Поиск может вестись и методом прослушивания шума, обусловленного течением воды в подземном канале стока, в крест простирания рытвины. Такое прослушивание более эффективно после выпадения осадков, когда «работают» каналы, в которых постоянный водоток отсутствует.

Опытно-экспериментальное «окно разгрузки» было пройдено в нижней части рытвины, примыкающей к правому плечу трога, образованного ледником Маншук Маметовой. Рисунки 10.3–10.6 демонстрируют последовательные этапы работ. Общий вид рытвины показан на рисунке 10.3, на рисунке 10.4 – участок рытвины до начала работ, на рисунке 10.5 – вскрытие шурфом подземного канала стока. На рисунке 10.6 представлен окончательный вид «окна» [19].

Общая схема устройства «окна разгрузки» показана на рисунке 10.7. Важно, чтобы высотные отметки дна поверхностного канала стока, начинающегося в «окне разгрузки», обеспечивали беспрепятственный сток воды с днища шурфа при повышении давления в подземном канале. В настоящее время готова к «сработке» рытвина, расположенная рядом с рытвиной №18 (рисунок 10.8).

В том случае, если рытвина сработала, то предупреждение ее очередной разгрузки после заполнения рытвины рыхлообломочными породами может быть предотвращено двумя способами:

1. Укладкой перфорированной трубы на дно сработавшей рытвины, по которой будет происходить сток паводковых вод, концентрирующихся в придонной области рытвины. Это исключит в дальнейшем возможность возникновения напорного режима движения подземных вод и тем самым обводнения рыхлообломочных пород, накопившихся в рытвине.

Рисунок 10.3. Общий вид рытвины

Рисунок 10.4. Участок рытвины до начала работ

Рисунок 10.5. Вскрытие шурфом подземного канала стока

Рисунок 10.6. Окончательный вид «окна разгрузки»

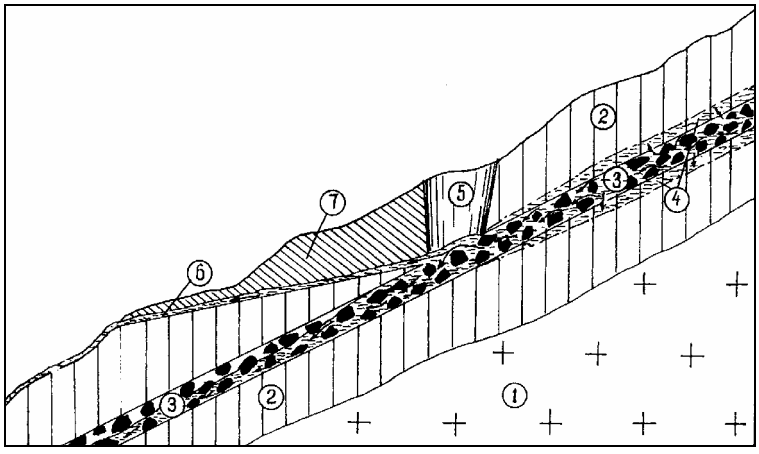


Рисунок 10.7. Схема устройства «окна разгрузки».
1 – коренные породы; *2* – отложения наносов, заполняющих рытвину;
3 – подземный канал стока, образованный в теле рытвины, лишенный мелкозема между крупными обломками; *4* – зона обводнения вокруг канала стока;
5 – шурф, вскрывающий подземный канал стока; *6* и *7* – днище и стенки выработки, которая обеспечивает беспрепятственный переход подземного стока в поверхностный

Рисунок 10.8. Рытвины, готовые «сработать»
при выпадении селеформирующих осадков (верховье р. Киши Алматы)

2. Созданием из крупнообломочных фракций горных пород вертикальных «водоводов», сооружаемых в рытвине через 50–100 м. Их назначение – вывод подземных вод на поверхность рытвины, что исключит возможность формирования напорного движения воды в подземном канале стока.

Предотвращение селеформирования в рытвинах, активизирующих селевые процессы во врезах и руслах рек, путем трансформации подземного стока в поверхностный не приведет к существенному изменению расхода дождевых паводков из-за относительно малых площадей водосборов, примыкающих к рытвинам.

10.3. Методы предотвращения зарождения озер моренно-ледниковых комплексов

Селеопасные поверхностные водоемы на моренно-ледниковых комплексах образуются в результате увеличения размеров незначительных водоемов, возникающих вследствие различной скорости таяния льда, обусловленной:

разностью уклонов смежных частей открытого ледника;

различием скорости абляции открытой и замороженной частей ледника.

Появление на незначительно наклоненной (первые единицы градусов) поверхности языка открытого ледника водоема с площадью несколько десятков квадратных метров может служить сигналом зарождения озера,

прорыв которого в будущем может привести к формированию катастрофического селя. Вода обладает значительно меньшим альбедо по сравнению со льдом, а тем более снегом, благодаря этому таяние льда под слоем воды происходит быстрее, чем на берегах водоема. Примером может быть зарождение и развитие озера №13-бис на леднике Советов (бассейн р. Кумбель, северный склон Иле Алатау). Три маленьких озерца, возникших в начале XXI века, уже к 2010 г. образовали, после слияния и совместного развития, озеро с объемом около 150 тыс. $м^3$, что почти в два раза превышает объем озера №13, прорыв которого в 1977 г. привел к формированию катастрофического селя и нескольких вторичных селей 3–31 августа. Суммарный объем этих селей составил (по различным оценкам) 2,4–6 млн $м^3$ [1, 57, 242].

Столь быстрое развитие озера №13-бис объясняется благоприятными гидрометеорологическими и геолого-геоморфологическими условиями:

озеро зародилось на практически неподвижной части языка ледника, содержавшего крайне незначительное количество рыхлообломочных пород;

озеро находится в средней части широкой долины, благодаря чему солнечные лучи попадают на его поверхность большую часть дня;

объем воды в озере увеличивается в основном за счет протаивания озерной котловины, приток воды в него с вышерасположенной части ледника незначителен, а сток воды из озера отсутствовал, благодаря чему солнечная энергия и энергия теплообмена воды затрачивались преимущественно на повышение температуры воды и таяние льда.

Развитие озер на открытой поверхности языка ледников может быть предотвращено созданием искусственного канала стока. Канал стока может быть образован механическим способом или бурением скважины в ледяной озерной перемычке. Если поверхностная морена на озерной перемычке отсутствует, канал стока может быть образован путем покрытия льда на трассе канала веществами, хорошо поглощающими солнечную энергию. Например, угольным порошком, хорошо зарекомендовавшим себя в экспериментах по повышению таяния ледников Памира и Тянь-Шаня на территории СССР с целью повышения стока горных рек в вегетационный период.

Поверхностные водоемы. Стационарными называются озера, постоянно заполненные водой. Озера, опорожняющиеся вследствие инфильтрации воды в борта и дно водоемов в периоды нулевой или слабой приточности, классифицируются как нестационарные [22]. Нестационарные озера образуются в результате временного заполнения водой пустующих котловин. Как правило, это каровые котловины. Примером не каровых котловин может быть неоднократно заполнявшаяся в результате закупорки подземного канала стока котловина на леднике Жарсай (бассейн р. Есик).

Наиболее известными каровыми озерами, прорыв которых приводил к формированию крупных селей в Иле Алатау, являются озера №16 (бассейн р. Каскелен) и озеро под висячим ледником Юбилейный (бассейн р. Средний Талгар). Прорыв этих озер происходил в результате вскрытия подземных каналов стока, закупорившихся в осенне-зимний периоды года.

Несмотря на относительно небольшой объем озера (не более 100 тыс. $м^3$) под ледником Юбилейный и крайне незначительный расход воды при его

прорыве (3–5 м^3/с), в створе радиооповестителя (РОС) «Правый Талгар-дубль» сель имел расход, близкий к 1340 м^3/с [1]. Объясняется это очень высокой степенью увлажнения морены и большим средним уклоном (более 30º) (рисунок 10.9).

Рисунок 10.9. Селевой очаг на морене ледников Юбилейный, Солнечный и Дамалак (бассейн р. Средний Талгар)

При облете, совершавшимся с целью выявления селеопасных озер северного склона Иле Алатау, образование этого озера не было замечено наблюдателем, так как водная поверхность была перекрыта всплывшим снегом, лежавшим до этого на дне пустовавшей котловины. В ходе весенне-летнего таяния снега котловина заполнилась водой и начался ее поверхностный перелив через ледяную перемычку. В процессе перелива, длившегося, скорее всего, недолго, произошел прорыв подземного канала стока. Несмотря на крайне незначительный расход воды, развитие цепного селевого процесса привело к формированию селя, нанесшего, по данным ГУ «Казселезащита», значительный материальный ущерб (общий ущерб превысил 130 млн рублей, прямой ущерб достигал 46 млн рублей в ценах 1993 г.) [1].

Примером образования котловины, обусловленного разностью уклонов поверхностей смежных частей открытого ледника, может быть котловина, образовавшаяся в верховьях ледника Туйыксу.

На дне котловины имелся вход в подземный канал стока, поэтому котловина развивалась только за счет солнечной радиации и тепла воздушных масс. В 2007–2008 гг. вход в подземный канал стока был перекрыт и талые воды полностью заполнили котловину. Температура воды, накопившейся в котловине, оказалась достаточной для того, чтобы (в ходе перелива воды через ледяную перемычку) она была постепенно «прорезана» практически до дна.

В качестве примера образования озера в результате различия скоростей абляции открытой и замороженной частей ледника может служить озеро №2 на леднике Туйыксу, развивавшееся около 50 лет. В результате его прорыва образовался катастрофический сель с объемом около 4 млн $м^3$, который был задержан в селехранилище в урочище Медеу в 1973 г.

Подземные водоемы. Своим образованием подземные водоемы моренно-ледниковых комплексов обязаны в основном теплу вод, текущих по подземным каналам стока. Полости, заполняемые водой, могут формироваться как в ледяных толщах, так и в мерзлых грунтах морен и каменных глетчеров. Даже небольшие водные потоки (с расходом 0,05–0,1 $м^3/с$) способны при движении по подземным каналам создавать в каменных глетчерах гроты с площадью поперечного сечения в десятки квадратных метров. На рисунке 10.10 приведена фотография входного отверстия в грот, обнажившегося в результате провала его кровли на зандровом поле ледника Маншук Маметовой, в 2009–2010 гг. В 1997 г. вход в этот грот находился восточнее современного положения на расстоянии 100–150 м (рисунок 10.11).

Рисунок 10.10. Входное отверстие в грот на зандровом поле ледника Маншук Маметовой в 2010 г. На переднем плане – глыбы, упавшие сверху и перекрывающие вход в грот

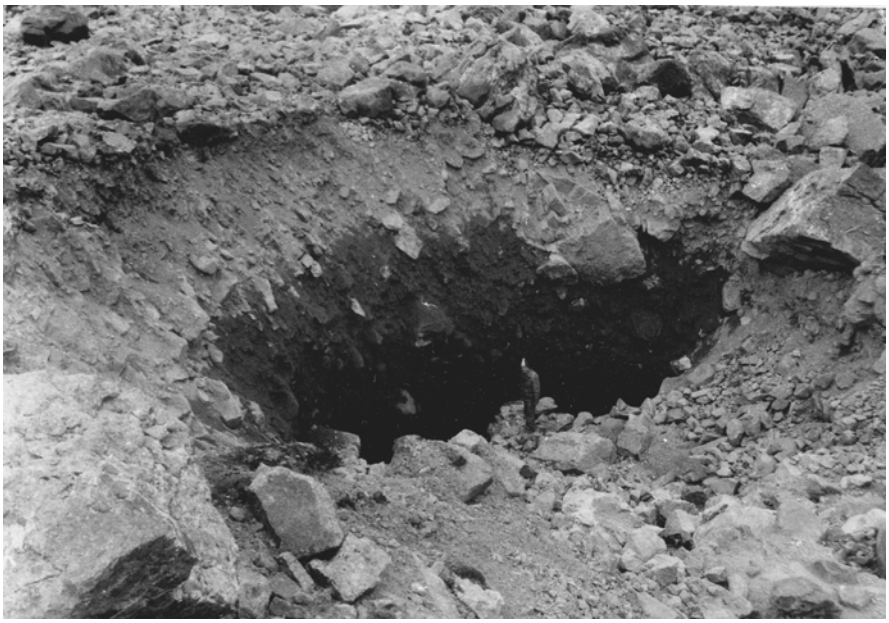


Рисунок 10.11. Вход в грот в 1997 г. О его размерах можно судить по фигуре человека, стоящего у входа в грот

Известно, что поровое пространство мерзлых грунтов морен и каменных глетчеров может быть (более 50 % по объему) заполнено льдом. Кроме того, в древних моренах могут находиться и крупные массивы мертвого льда. О наличии таких массивов в древней морене ледника Абая свидетельствуют крупные проседания на поверхности этой морены, появившиеся в последнее десятилетие на высоте 2800–3000 м.

Новые подземные каналы стока образуются, когда по какой-либо причине изменяются пути течения талых вод по поверхности зандровых полей. Около трех десятилетий после катастрофического опорожнения озера №2 значительная доля талых вод ледника Туйыксу протекала сосредоточенным поверхностным потоком по дну этого озера, затем по дну озера №3 и далее по фронтальной части морены ледника Туйыксу. Несколько лет назад, вследствие переотложения наносов на зандровом поле, расположенном на более высоких отметках юго-восточнее озера №2, поток, сменив направление течения, стал впадать в грот, расположенный в северо-восточной части зандрового поля (рисунок 10.12). Временами грот частично закупоривался и тогда на поверхности зандра возникало неглубокое озеро. Прогрев воды и незначительная мощность морен приводили к таянию льда, на котором образовался зандр. Со временем высотные отметки зандра понижались (вследствие таяния погребенного льда) и на его месте формировалась котловина, в которой при закупорке грота могла в больших объемах накапливаться вода. Со временем котловина (при заполнении ее водой) могла приобрести объем, соизмеримый с объемом озера №2, и представлять опасность при его катастрофическом прорыве.

Рисунок 10.12. Зандровое поле и вход в ледяной грот на языке ледника Туйыксу

Однако последующие события показали, что возможен и иной вариант развития. В ходе дальнейшего отложения наносов высотный уровень поверхности зандрового поля достиг значений, на которых находилась трещина во льду, соединяющаяся с подземным каналом стока. И в настоящее время вода практически по всей восточной периферии зандра имеет возможность поступать в подземный канал стока (рисунок 10.13).

Рисунок 10.13. Пример, когда вода имеет возможность поступать
в подземный канал стока по периферийной части зандрового поля

Дальнейшие события будут зависеть от того, сможет ли отложение наносов привести к ситуации, когда вода будет поступать в подземный канал стока на локальном участке. В этом случае вероятность закупорки канала стока в осенне-зимние периоды значительно возрастет и возникнет ситуация, при которой котловина заполнится водой, образуя водоем, прорыв которого может привести к формированию катастрофического селя.

Попадая в подземный канал стока, вода, имеющая положительную температуру, способствует таянию льда. При этом в моренно-ледниковых комплексах могут формироваться пустоты, способные накапливать большие объемы вода. Прорыв этих вод создает паводки, способные при благоприятных условиях трансформироваться в катастрофические сели.

Вода, заполнив пустоты, может изливаться на земную поверхность в виде родников с достаточно большим дебитом. Так, на фронтальной части современной морены ледника Туйыксу на дневную поверхность изливается три достаточно крупных родника. На рисунке 10.14 показаны выходы трех родников. Координаты 3-го родника: 43º04′55,77″ с.ш. и 77º04′91,6″ в.д., высотная отметка 3169 м. Координаты 2-го родника: 43º04′52,2″ с.ш. и 77º04′87,1″ в.д., высотная отметка 3127 м. Координаты 1-го родника: 43º04′34,22″ с.ш. и 77º04′46,93″ в.д., высотная отметка 3115 м. Все три родника близки по дебиту – 0,07–0,1 м^3/с.

Родники сливаются в 150–200 м, образуя исток р. Киши Алматы. Поскольку расход воды (по мере течения реки) быстро увеличивается, можно уверенно говорить о подпитке реки выходами в ее русло подземных вод.

Рисунок 10.14. Выход родниковых вод на поверхность морены ледника Туйыксу

Судя по тому, что расход водных потоков, втекающих в гроты, изменяется в течение суток практически от нуля до нескольких сотен литров в секунду, а дебиты родников – незначительно, можно утверждать, что объем подземных водоемов велик. Существование подземных водоемов подтверждается данными, приведенными в таблице 10.1.

Таблица 10.1. Максимальный расход прорыва подземных водоемов ледника Туйыксу, $м^3/с$

№	Дата	Река, гидрологический пост	Максимальный расход воды	Средний месячный расход
1	20.08.1951	Киши Алматы, «Мынжылки»	15,8	1,31
2	07.08.1956	Киши Алматы, «Мынжылки»	31,5	2,03
3	18.07.1974	Киши Алматы, «Мынжылки»	6,0	2,02

Наибольшую известность в Иле Алатау получил прорыв внутриледниковых вод на леднике Туйыксу в 1956 г. Объем излившейся воды составил 1,5–2,0 млн $м^3$ [29]. На протяжении первых двадцати лет второй половины прошлого века внутриледниковые водоемы бассейна р. Киши Алматы ничем себя не проявляли, хотя об их наличии свидетельствовало выклинивание талых вод на фронтальной части современной морены ледника Туйыксу с суммарным расходом, порой превышавшим 1,5 $м^3/с$.

Однако в 1974 г., через год после образования селя 1973 г., нанесшего большой ущерб, у подножия современной морены, в селевом очаге, образованном в 1973 г., открылся грот, из которого с максимальным расходом 6 $м^3/с$ на протяжении нескольких суток истекала вода [243].

Простейшие подсчеты показывают, что объем излившейся воды был не менее 200–300 тыс. $м^3$. Если бы этот водоем опорожнился одновременно с опорожнением озера №2, скорее всего, селехранилище в урочище Медеу переполнилось и г. Алматы ждала катастрофа. Этот урок необходимо не забывать.

Нет сомнений в том, что моренно-ледниковый комплекс Туйыксу содержит не один подземный водоем. В какой-то мере впервые оценить объем одного из них стало возможным летом 2000 г. В результате интенсивного таяния ледника Туйыксу, сопровождавшегося выносом относительно большого объема рыхлообломочных пород, русло потока изменило направление. Если ранее большая часть талых вод ледника Туйыксу в виде сосредоточенного потока перемещалась по поверхности морены, то со второй половины лета 2000 г. поток уходил в ледяной грот. На фронтальной морене ледника Туйыксу появился дополнительный выход талых вод, связанный с этим гротом. Об этом свидетельствовало синхронное поступление очень мутной воды в грот (дневное таяние ледника) и выклинивание осветленной воды на фронтальной части морены. Изменение мутности воды на входе и выходе внутриледникового водоема оказалось эквивалентным изменению мутности воды, попадающей в грот, при ее отстаивании в литровой бутылке в течение 8–10 сут. Это позволяет утверждать, что

объем внутриледникового водоема более чем в 10 раз превышал объем суточного поступления воды в грот, т.е. объем водоема был не менее 300–400 тыс. $м^3$.

Исследования А. П. Горбунова показали [244], что в условиях активного горообразования талые воды, проходящие через морену путь протяженностью 100 м, охлаждаются на 0,6–0,9 °С. По нашим наблюдениям, вода, пройдя по внутриморенной полости в морене ледника Туйыксу, охлаждалась на 0,5 °С, следовательно, объем внутриледникового водоема ежегодно возрастал примерно на 25 тыс. $м^3$, т.е. за 5 лет он увеличился на 125 тыс. $м^3$, и представляет, в случае катастрофического прорыва, реальную угрозу. Приведенные цифры увеличения внутриледникового водоема хорошо согласуются с мнением А. П. Горбунова о том, что «… за один абляционный период возможно увеличение емкости полости на 15–20 тыс. $м^3$ …» [244].

10.4. Методы превентивного опорожнения озер моренно-ледниковых комплексов

До настоящего времени превентивные мероприятия по снижению ущерба от селей в Казахстане ограничиваются опорожнением моренных озер. Экономическая и экологическая эффективность проведения таких работ достаточно высока. В зависимости от морфометрических характеристик озер, строения озерных перемычек, разрушение которых естественным путем может привести к формированию катастрофических селей, применяются различные способы контролируемого опорожнения селеопасных водоемов. К ним относятся прокладка водосбросных лотков; прокладка тросов – нагревательных электрических элементов, с помощью которых создаются пионерные каналы стока в ледяных плотинах (дальнейшее увеличение их размеров происходит за счет тепла воды, текущей по этим каналам); бурение скважин и проходка туннелей в ледяных перемычках; искусственное контролируемое разрушение озерных перемычек [245].

Накопленный опыт борьбы с селями свидетельствует о том, что затраты на превентивное опорожнение поверхностных водоемов моренно-ледниковых комплексов могут быть на порядки меньше, чем затраты на задержание селей, образующихся в результате трансформации паводков, формирующихся при прорыве таких водоемов, в сели. Объясняется это тем, что объемная концентрация твердого компонента в селевой массе может достигать 90 %, а объем воды, вовлекаемой в селеформирование вместе с рыхлообломочными породами, слагающими русло, даже превышать объем воды, излившейся из водоема. Так, во время селя 1973 г. в бассейне р. Киши Алматы 1 $м^3$ воды трансформировался практически в 20 $м^3$ селевой массы.

Необходимо, однако, при искусственном опорожнении водоемов моренно-ледниковых комплексов иметь в виду, что практически любое вмешательство в ход природных процессов на определенных этапах работ приводит к уменьшению их устойчивости. Это чревато катастрофическими последствиями вследствие перехода процессов, управляемых человеком, в

неуправляемые. Такие ситуации необходимо выявлять на стадии проектирования работ, а при их выполнении строго следить за регламентом исполнения. При проведении работ необходимо принимать меры по обеспечению безопасности населения и уменьшения возможного материального ущерба.

Эффективность работ по превентивному опорожнению озер моренно-ледниковых комплексов определяется несколькими факторами, главными из которых являются:

время, отводимое для проведения превентивных мероприятий;

бюджет мероприятия;

геологическое строение озерной перемычки;

степень заполнения озера (в том числе наличие поверхностного перелива);

расход воды при поверхностном переливе;

температура воды в озере.

Опыт работы ГУ «Казселезащита» показывает, что время, затрачиваемое на опорожнение селеопасного озера в некритической ситуации, определяется в решающей мере геологическими условиями, качеством предварительной научно-технической подготовки к проведению работ, степенью подготовленности лиц, ответственных за состав и порядок проведения мероприятия, их способностью к адекватному восприятию (в сложных, непрерывно изменяющихся ситуациях) рекомендаций специалистов и даже просто рабочих, принимающих участие в проведении работ. Сроки выполнения работ могут колебаться от нескольких дней до нескольких месяцев. Так, предварительная полевая подготовка и собственно опорожнение озера №6 на леднике Маншук Маметовой в 1997 г. длились около 3,5 месяцев.

Бюджет мероприятия. Стоимость мероприятий по превентивному опорожнению селеопасных озер определяется затратами на предварительную подготовку к проведению работ, включающую в себя технико-экономическое обоснование, научные и проектные работы, изготовление нестандартного оборудования и т.д., продолжительностью проведения полевых работ, численностью состава их исполнителей. Поскольку обсуждаемые работы, как правило, проводятся в районах, недоступных для автомобильного транспорта, значительная доля затрат может приходиться на оплату эксплуатации вертолета. Одним из примеров дорогостоящих мероприятий по опорожнению селеопасных водоемов может служить опорожнение озера №6 на леднике Маншук Маметовой. Общие затраты на их проведение в течение 3,5 месяцев превысили 200 тыс. USD в ценах 1997 г. Несмотря на высокую социально-экономическую эффективность превентивных мероприятий, затраты на их проведение, как упоминалось, в бюджете ГУ «Казселезащита» составляют около 5 % [22].

Геологическое строение озерной перемычки. Озерная перемычка может быть сложена из:

практически чистого льда;

рыхлообломочных пород с различной степенью увлажнения;

рыхлообломочных пород с включениями льда.

Рыхлообломочные породы могут быть мерзлыми, при этом их поры могут быть в различной степени заполнены замерзшей водой или талыми с различным содержанием поровых вод.

Степень заполнения озера. Озерная котловина, объем которой при заполнении ее водой представляет опасность, может быть пустой или частично заполненной. При заполнении котловины водой происходит ее перелив через озерную перемычку.

Расход воды при поверхностном переливе. Он определяется поступлением воды в озерную котловину и ее фильтрацией через смоченную поверхность котловины.

Температура воды в озере. Она может находиться от нуля до нескольких градусов Цельсия и лишь в очень редких случаях превышать 10 ºС.

10.4.1. Метод опорожнения селеопасного озера с использованием взрывчатых веществ

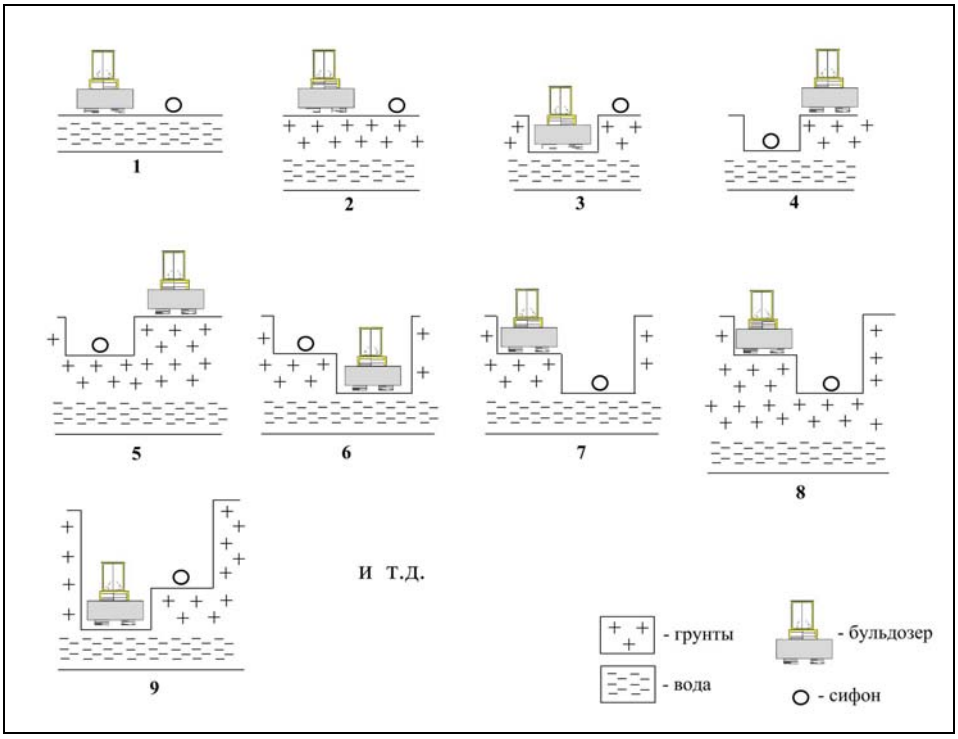
Если превентивное опорожнение поверхностных водоемов допускает возможность неконтролируемого хода процесса опорожнения (такая возможность возникает в период малых уровней заполнения котловин в начальной его стадии в весенне-летний период), снижение селеопасности осуществляется путем уменьшения уровня заполнения озерных котловин водой с помощью открытых каналов-траншей, подобных нагорным канавам, широко использующихся для отвода вод при геологоразведочных и иных работах. При проходке траншей широко применяются взрывчатые вещества (ВВ) на выброс, при этом в целях безопасности масса ВВ одного заряда не должна была превышать 300 кг, а глубина одного яруса (слоя дробления) для мокрого грунта – 0,5 м, для сухого – 1,5 м [22].

Окончательно траншея формируется вручную с использованием мотопомп, а при благоприятных условиях – с помощью бульдозеров. Сброс воды на этой стадии работ осуществляется с расходом, обеспечивающим формирование отмостки из крупных фракций гранулометрического состава, что исключает неконтролируемое увеличение расхода воды вследствие роста глубины траншеи в ходе эрозионных процессов.

10.4.2. Метод опорожнения селеопасного озера с использованием бульдозера и сифонов

При больших уровнях заполнения котловин водой и недопустимости неконтролируемого опорожнения водоемов, в условиях возможности использования землеройной техники (бульдозера), может использоваться методика опорожнения с применением бульдозера и сифонов.

В ходе опорожнения используются бульдозер и сифон (система сифонов). Сифон предназначен для откачки воды из озера, его производительность должна превышать поступление воды в озерную котловину. Теоретическое обоснование работы сифонов в условиях высокогорья и результаты практического их использования для дренажа вод моренных озер приведены в работах Е. Д. Дуйсенова [143, 246].



Позиция *1*.	Бульдозер и высшая точка сифона находятся на гребне перелива.
Позиция *2*.	Уровень воды в озере с помощью сифона понижается.
Позиция *3*.	Бульдозер отрывает траншею до уровня воды в озере в соответствии с позицией *2*.
Позиция *4*.	Сифон опускается в траншею, бульдозер перемещается на высотную отметку сифона в соответствии с позицией *3*.
Позиция *5*.	Уровень воды в озере с помощью сифона понижается.
Позиция *6*.	Бульдозер отрывает траншею до уровня воды в озере в соответствии с позицией *5*.
Позиция *7*.	Сифон опускается в траншею, бульдозер перемещается на высотную отметку сифона в соответствии с позицией *6*.
Позиция *8*.	Уровень воды в озере с помощью сифона понижается.
Позиция *9*.	Бульдозер отрывает траншею до уровня воды в озере в соответствии с позицией *8* и т.д. до проектной отметки опорожнения озера.

Рисунок 10.15. Последовательность действий при опорожнении озера

Последовательность действий при опорожнении озера показана на рисунке 10.15.

Основные трудности, связанные с широким внедрением описанного метода в практику опорожнения селеопасных озер, связаны с доставкой землеройной техники к месту работ и вероятностью мерзлого состояния грунта, слагающего перемычку. Однако современные бульдозеры способны преодолевать подъемы крутизной до 30º, а на особо сложных участках они могут самостоятельно создавать для себя тракторные тропы на древних моренах Иле Алатау.

Современные ручные электрические перфораторы, как показал опыт их использования при опорожнении озера №6, способны в короткие сроки проходить в мерзлых породах и во льду шпуры длиной до 1 м. Их можно использовать при дроблении мерзлых пород с помощью малых зарядов взрывчатых веществ.

Описанный способ опорожнения селеопасных озер обладает повышенной устойчивостью к неконтролируемому катастрофическому опорожнению в ходе проведения работ, однако требует неукоснительного выполнения правил техники безопасности при землеройных работах на современных моренах.

10.4.3. Механико-гидравлический метод опорожнения селеопасного озера

Метод заключается в механическом удалении (вручную или с помощью лебедки) с поверхности будущего канала стока валунов с размерами, превышающими 80 % обеспеченности по полной кривой гранулометрического состава грунта, слагающего озерную перемычку. При необходимости мелкозем вокруг крупных камней размывают струей воды. Уровень воды в озере поднимают (путем создания плотины из мешков с песком) с таким расчетом, чтобы при заданных размерах порога водослива (гребня перемычки) создать размывающую скорость [22, 247] и обеспечить вынос грунта по длине канала стока. Крупные камни, сформировавшие на дне канала стока отмостку, вновь убираются, а следующий слой мелкозема вымывается накопленной в озере водой. Эти операции продолжаются до полной сработки озера.

Описанный метод весьма трудоемок и его целесообразно применять лишь в тех случаях, когда перемычка сложена преимущественно мелкоземом с незначительным содержанием камней, вес которых превышает 20–30 кг, и имеет незначительную длину.

10.4.4. Гидравлический метод опорожнения селеопасного озера

В процессе подготовки и опорожнения озера №6 на леднике Маншук Маметовой в 1997 г. участвовало несколько организаций (ГКЧС, Казселезащита, Алматыгидропроект, КазНИИМОСК). Для опорожнения озера был выбран гидравлический метод. Оборудование, необходимое для его реализации, было предложено специалистами перечисленных организаций.

Гидравлический метод позволяет использовать энергию водного и селевого потоков для создания прорана в озерной перемычке, сложенной льдом и мерзлым грунтом с большим содержанием крупных фракций (валунов и глыб), а также переноса большого объема грунта (тысячи, десятки тысяч кубометров) на относительно большое расстояние (сотни и тысячи метров).

Особенности гидравлического метода. Водный паводок формируется в результате согласованного во времени открытия мягкого и жесткого затворов (рисунок 10.16). Применение мягкого затвора позволяет создать отно-

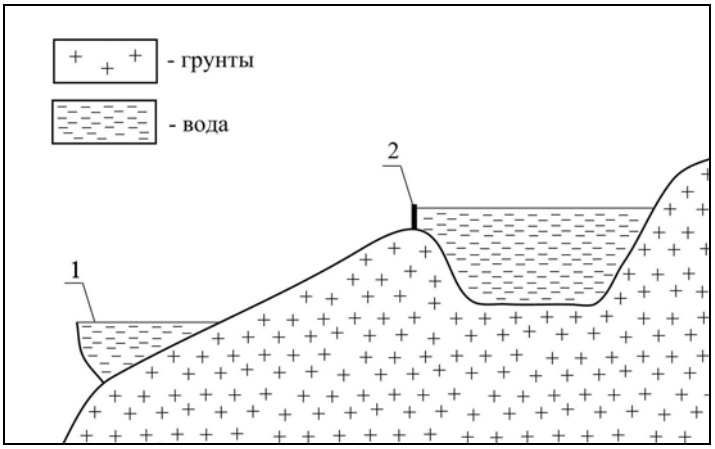


Рисунок 10.16. Схема установки мягкого и жесткого затворов:
1 – мягкий; *2* – жесткий затвор

сительно большой кратковременный расход воды во фронтальной части паводка без значительного увеличения уровня воды в опорожняемом водоеме. На рисунке 10.17 приведен гидрограф паводка (в створе плотины), формирующейся в результате открытия мягкого затвора при различных уклонах русла. Нетрудно видеть, что при уровне воды, близком к 2 м, необходимом для размыва, расход (на один метр длины фронта волны) 1–2 $м^3/с$ существует лишь первые секунды. Большая часть объема паводка имеет расход меньше необходимого и вследствие того, что мягкий затвор не позволяет прервать паводок, играет отрицательную роль: формирует отмостку. Восполнить этот недостаток призваны паводки, формирующиеся при открытии жестких затворов. Открытие мягкого затвора синхронизируется с паводком, возникающим при открытии жесткого затвора.

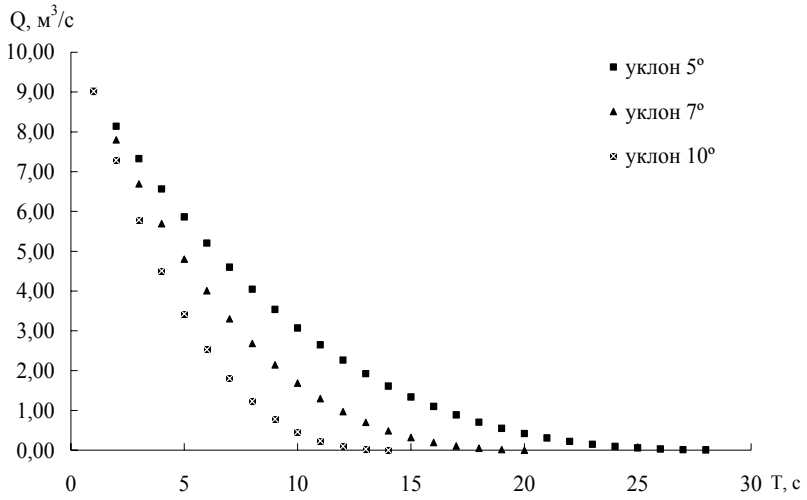


Рисунок 10.17. Гидрограф водного паводка при различных уклонах русла.
Уровень воды в створе мягкой плотины 2 м, ширина русла 3 м

Гидрографы водных паводков, образуемых согласованным во времени открытием мягкого и жесткого затворов, приведены на рисунках 10.18 и 10.19. Из этих рисунков следует, что даже относительно небольшая подпитка паводка, формирующегося при открытии мягкого затвора, значительно увеличивает время существования суммарного расхода, способного углублять русло без формирования отмостки.

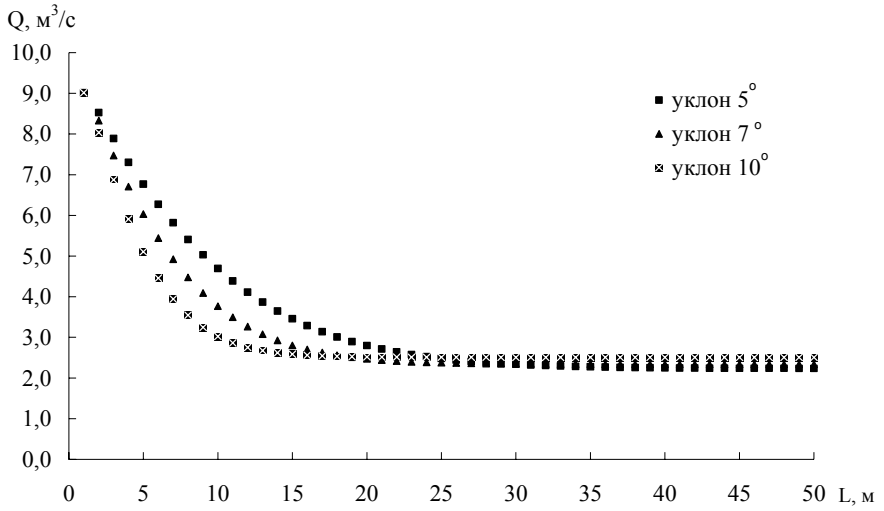


Рисунок 10.18. Гидрограф водного паводка с дополнительной подпиткой при различных уклонах русла. Подпитка 2 м^3/с

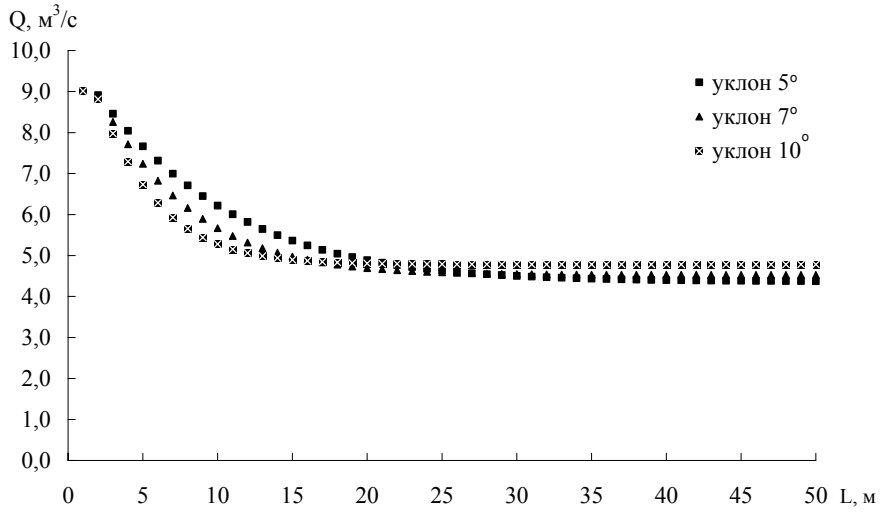


Рисунок 10.19. Гидрограф водного паводка с дополнительной подпиткой при различных уклонах русла. Подпитка 4 м^3/с

Если уменьшение расхода тыловой части паводковой волны (в условиях отсутствия подпитки) обусловлено морфометрией водоема, образующегося за мягким затвором, то фронтальная часть волны уменьшается вследствие ее распластывания по мере движения по руслу. Из рисунка 10.20 следует,

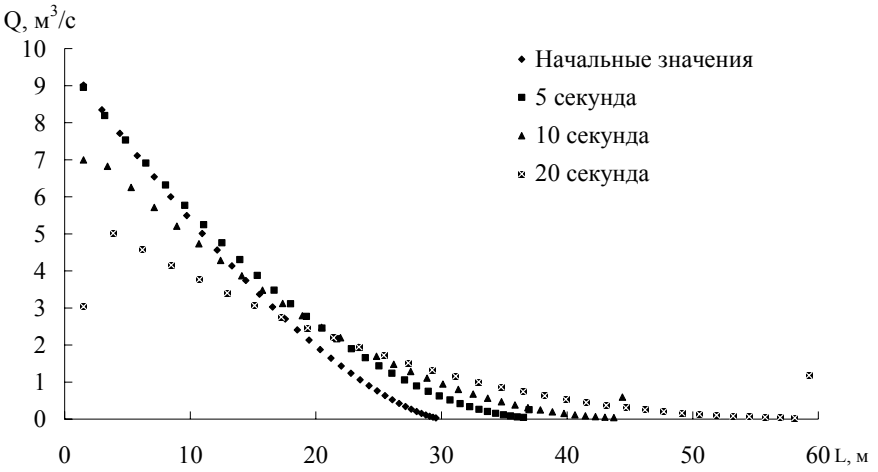


Рисунок 10.20. Трансформация гидрографа паводка во времени

что уже через 20 с максимальный расход уменьшается с 9 до 2,5 м^3/с, а как показывают расчеты, фронт паводковой волны находится всего лишь в 30 м от створа мягкого затвора. Фронтальная часть паводковой волны уменьшается и за счет потерь, обусловленных потерями воды в отрицательных формах рельефа русла водотока.

Все это свидетельствует о том, что без мощной поддержки паводком, образующимся при открытии жесткого затвора, попытки опорожнения озер, перемычка которых сложена грунтом, содержащим крупные камни и глыбы, гидравлическим методом бесперспективны.

С помощью фронтальной части паводка осуществляется срыв отмостки, образовавшейся на конечной фазе предыдущего попуска. Основная часть объема паводка создается в результате открытия жесткого затвора, ее назначение – размыв русла и вынос грунта за пределы канала стока.

При всех положениях мягкого затвора углубление русла должно производиться, как минимум, до проектных значений. Уклон русла ниже мягкого затвора должен поддерживаться на значениях, превышающих 13º. На таких уклонах крупные частицы могут самостоятельно перемещаться (путем качения) со скоростью, превышающей движение потока.

С целью предотвращения катастрофического разрушения перемычки 10-метровое пространство в верхнем бьефе жесткого затвора и канал между жестким и мягким затворами должны застилаться брезентом.

При малейших признаках формирования отмостки, в процессе попуска с целью углубления канала стока ниже мягкого затвора, необходимо прекратить попуск путем перекрытия жесткого затвора и расчистить канал от крупных частиц, имеющих между собой непосредственный контакт (признак формирования отмостки).

В ходе работ по опорожнению озер используются различные устройства и приспособления, предназначенные для формирования водных паводков и защиты русла от их эрозионного воздействия. Их эффективность

подтверждена в процессе опорожнения озера №6 на леднике Маншук Маметовой в 1997 г. [248].

Мягкий канал КазНИГМИ [245]. Мягкий канал (рисунок 10.21) образуют брезентовые полотнища *1* с установленными по краям пистонами *2*, к которым крепятся боковые растяжки *3*, свободные концы их привязываются к якорям *4*, забитым в прилегающие к руслу склоны. Брезентовые полотнища достаточно эффективно предохраняют канал стока от эрозии и увлажнения.

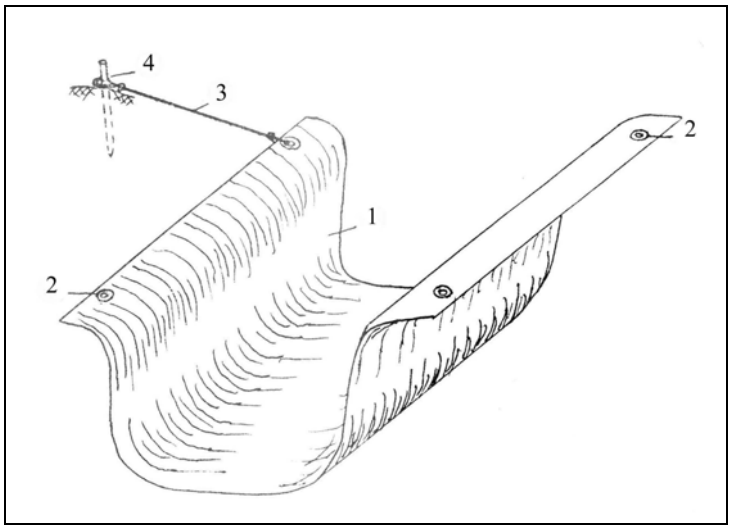


Рисунок 10.21. Мягкий канал:
1 – брезентовое полотнище; *2* – пистоны; *3* – боковая растяжка; *4* – якорь

Мягкий затвор КазНИИМОСК. Мягкий затвор изготавливается из брезентового полотнища. Последовательность сборки затвора показана на рисунке 10.22, позиции I–III. Заложенные внутрь углы брезентового полотнища *1* удерживаются с помощью завязок *2*. По наружным краям затвора пришиты петли *3* для шнуровки фронтальной части. Шнуры с одной стороны образуют с петлями неразъемные соединения *4*, с другой – разъемные *5*; к крайним верхним петлям крепятся боковые растяжки. Шнуры *6* изготовлены из капроновой веревки. Способ расшнуровки (см. рисунок 10.22): выдергивание деревянного клина *7* обеспечивает моментальное открытие затвора под давлением накопленной воды.

В ходе разработки мягкого затвора была изготовлена и испытана его модель в масштабе 1:10. Результаты испытания показали, что предлагаемый способ создания затвора и его раскрытия полностью себя оправдывает. Поэтому разработанный мягкий затвор был изготовлен в натуральную величину, длина его составляла 16 м, ширина – 12 м, в качестве шнуровки использовалась капроновая веревка диаметром 10 мм.

При полевых испытаниях мягкого затвора оказалось, что прочность брезента практически в два раза ниже, чем предусматривалось проектом Алматыгидропроекта. Анализ результатов испытания мягкого затвора

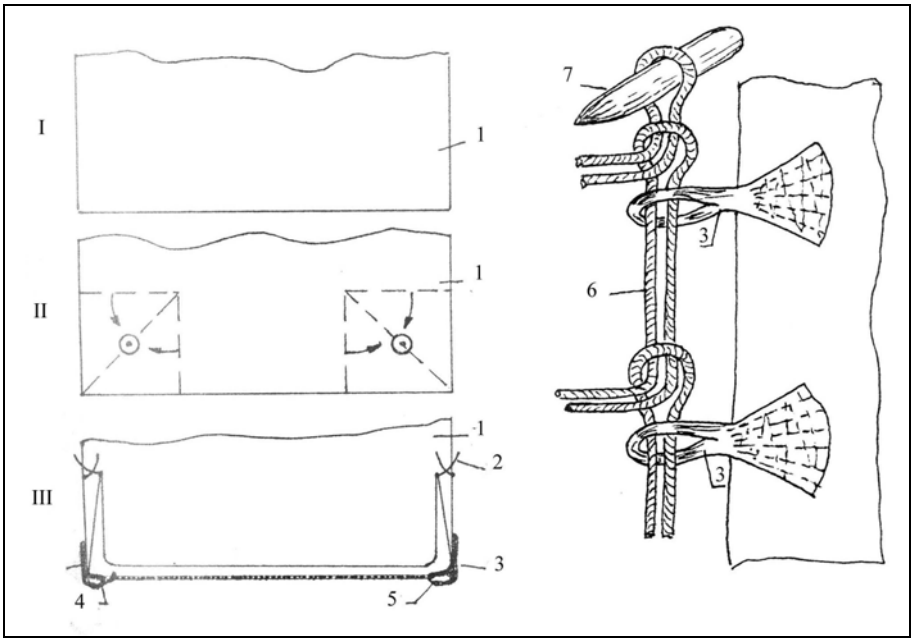


Рисунок 10.22. Мягкий затвор КазНИИМОСК.
I–III – последовательность сборки затвора.
1 – брезентовое полотнище; *2* – завязки; *3* – петли; *4* – неразъемные соединения;
5 – разъемные соединения; *6* – шнуры; *7* – деревянный клин

показал, что конструкция затвора работоспособна, ее применение наиболее рационально в условиях, когда форма сечения русла близка к трапецеидальной, а борта русла пологи и сложены грунтами, имеющими низкую механическую прочность. Эксплуатация мягкого и модернизированного затворов не требует квалифицированного обслуживания.

Полужесткий затвор КазНИИМОСК. В процессе монтажа мягкого затвора выяснилось, что введение жестких элементов, использовавшихся для удобства шнуровки, улучшает характеристики затвора, в особой мере это относится к горизонтальной балке, предложенной М. Т. Нурлановым. Использование жестких элементов значительно упрощало и конструкцию мягкого затвора, снижая требования к прочности брезента к минимуму. Модернизированная в течение нескольких часов конструкция затвора позволила осуществить серию непревзойденных в дальнейшем по расходу и объему попусков, позволивших сорвать образовавшуюся ранее отмостку и сформировать селевые потоки высокой плотности, останавливавшиеся в диапазоне требуемых высотных отметок. Максимальный уровень воды в емкости, образуемой описанным затвором, достигал 2,1 м, объем – 80–90 м^3.

Полужесткий затвор (рисунок 10.23) представляет собой брезентовое полотнище *1*, набрасываемое на набор досок *2*, расположенных веером и перекрывающих канал стока на высоту 2,2 м. Доски скреплены между собой капроновой веревкой *3*, создавая, таким образом, своеобразную сеть, не позволяющую образовываться «пузырям» при высоких значениях напора.

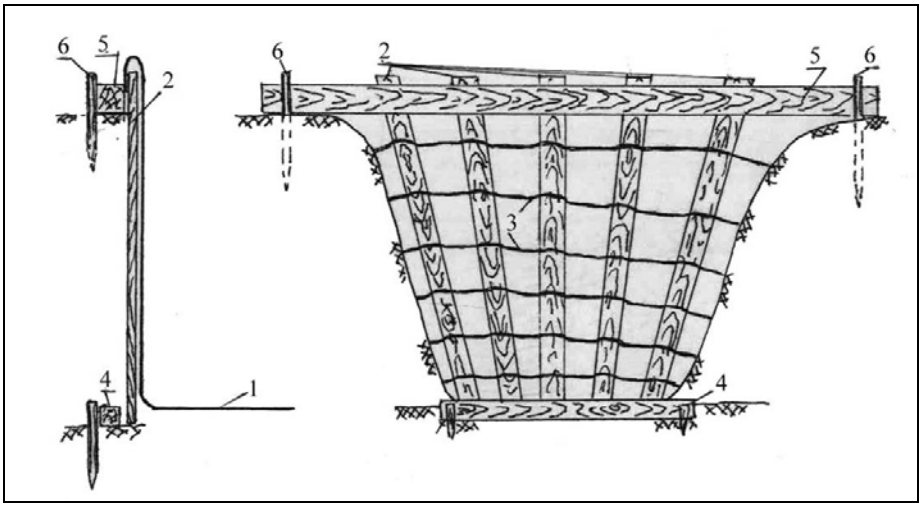


Рисунок 10.23. Полужесткий затвор КазНИИМОСК.
1 – брезентовое полотнище; *2* – доски; *3* – веревка; *4* – порожек; *5* – балка; *6* – лом

Нижними концами доски упираются в устроенный на дне канала порожек *4*, а верхними – в поперечную балку *5*, над которой они выступают на 100 мм. Концы балки упираются со стороны нижнего бьефа на два вбитых в грунт лома *6*. Такая конструкция позволяет получить максимальный напор. Для открытия затвора достаточно усилия одного человека, поднимающего конец балки над опорой с помощью лома.

Хронометраж показал, что приведение модернизированного затвора в рабочее состояние после очередного попуска составляет 5 мин 20 с, для его обслуживания необходима бригада из 4 человек.

Мягкий затвор, предложенный Н. В. Поповым (ГКЧС) и П. Н. Луганским (РОСО ГКЧС). Мягкий затвор, предложенный Н. В. Поповым, представляет собой брезентовое полотнище, которое укладывается в русло. Нижний конец его закреплен на веревке, растягиваемой в стороны, и образует собственно затвор. Затвор оказался неработоспособным. Веревка впоследствии была заменена тросом, но это не спасло положение. Допустимый напор воды не превышал одного метра. П. Н. Луганский модернизировал затвор, изменив длину векторов параллелограмма сил в пользу вертикальных составляющих с помощью растяжек *1* с верхней части склонов, которые частично компенсировали силу напора воды. Брезент *2* крепился к несущему тросу с помощью деревянных накладок. Несущий трос *3* натягивался домкратом *4*, затвор держали 6 анкеров *5*, испытывавших значительные нагрузки. Затвор срабатывал при помощи разъемных узловых соединений *6*. После модернизации затвор работал нормально, хотя и не обеспечивал высоких значений напора (максимум 1,8 м) (рисунки 10.24, 10.25).

Жесткий затвор Алматыгидропроекта. Затвор представляет собой два задвижных металлических плоских щита *1* в общей раме *2*, снабженных винтовыми подъемниками *3*. Затвор установлен на металлический лист *4*,

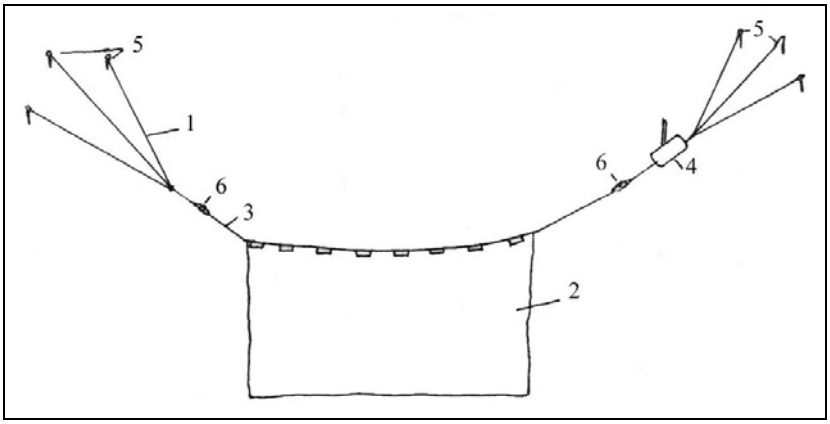


Рисунок 10.24. Мягкий затвор Н. В. Попова и П. Н. Луганского:
1 – растяжки; *2* – брезент; *3* – несущий трос; *4* – домкрат;
5 – анкеры; *6* – разъемные узловые соединения

Рисунок 10.25. Установка мягкого затвора Попова–Луганского

выпущенный в сторону нижнего бьефа и оборудованный с боков решетками из арматуры *5*, на которые укладывается балласт (мешки с грунтом), выполняющий роль плотины, сочленяющей берега озера с затвором. В вертикальном положении затвор удерживается с помощью укосин *6* (рисунок 10.26).

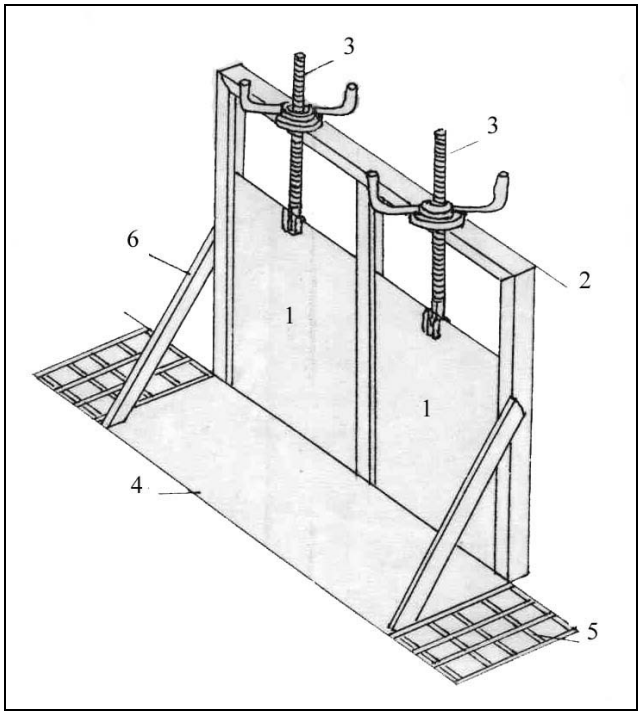


Рисунок 10.26. Жесткий затвор Алматыгидропроекта:
1 – металлический плоский щит; *2* – рама; *3* – винтовые подъемники;
4 – металлический лист; *5* – решетки из арматуры; *6* – укосина

10.5. Опыт превентивного опорожнения селеопасных моренных озер

Первые работы по опорожнению селеопасных моренных озер северного склона Иле Алатау осуществлялись под методическим руководством первого начальника Казглавселезащиты Б. С. Ниязова. Характер превентивных мероприятий, как упоминалось, в решающей мере определяется временем, отпущенным природой с момента осознания опасности возникновения катастрофического селя, до его формирования.

Примером весьма ограниченного времени, отпущенного для проведения превентивных мероприятий, могут служить события, имевшие место в бассейне р. Есик в 1977 г. [247]. Как известно, сель 1963 г., образовавшийся в результате прорыва озера на леднике Жарсай, уничтожил завальное озеро Есик. Город Есик не только пострадал от катастрофического паводка, образовавшегося в ходе прорыва озера, но и лишился природного селехранилища, защищавшего конус выноса р. Есик на протяжении тысяч лет от катастрофических селей.

В 1977 г., когда котловина на леднике Жарсай вновь заполнилась водой и возникла реальная угроза разрушения селем г. Есика, Правительство Казахстана поставило перед учеными и проектировщиками г. Алматы, ГУ

«Казглавселезащита» задачу в кратчайший срок выработать предложения по ликвидации или смягчению последствий нависшей угрозы.

Анализ сведений о прошедших селях в бассейне р. Есик, материалов аэрофотосъемок различных лет, рекогносцировочных обследований на моренно-ледниковом комплексе ледника Жарсай в период начальной фазы заполнения котловины позволил специалистам Казахского научно-исследовательского гидрометеорологического института (КазНИГМИ) сделать следующие выводы:

1. Сели 1958 и 1963 гг. были вызваны прорывом того же водоема, который начал заполняться и в 1977 г.

2. Прорыв водоема в 1958 и 1963 гг. происходил через туннель в ледяной перемычке, расположенной в северной части котловины. Прорыву водоема в обоих случаях предшествовал перелив воды (по двум ложбинам) через перемычку, забронированную чехлом рыхлообломочных пород средней мощностью 0,1–0,2 м. Наличие чехла мешало термической эрозии в процессе поверхностного перелива и, как следствие, разрушению перемычки за счет тепла воды, вытекающей по понижениям в перемычке из озера. Это обстоятельство благоприятствовало тому, что ледяная пробка в туннеле протаивала и опорожнение водоема происходило в напорном режиме с расходом, достаточным для формирования катастрофических селей.

3. Перемычка сложена преимущественно льдом. Ширина перемычки составляет 70–80 м. Угол наклона фронтального и тылового бортов перемычки 65–70º.

4. В перемычке имеется, как минимум, один туннель (на поверхности перемычки прослушивались звуки падения в воду камней, вытаивающих из ледяного свода).

5. Последствия селя, который образуется в результате естественного прорыва водоема, будут катастрофическими для г. Есика.

На основании изложенного КазНИГМИ рекомендовал Правительству Казахстана провести превентивное опорожнение водоема на леднике Жарсай. Методическое руководство опорожнением озера было возложено на КазНИГМИ, а общее руководство и обеспечение рабочей силой – на Казглавселезащиту.

Быстрое заполнение котловины водой (уровень воды увеличивался примерно на 0,5 м за сутки) 24–26 июня 1977 г. делало неизбежным поверхностный перелив воды через перемычку. Проведение каких-либо взрывных работ на перемычке с целью прокладки канала стока было опасно, так как это могло спровоцировать вскрытие ледяного туннеля. Применение средств механизации исключалось из-за отсутствия дорог и малой грузоподъемности вертолетов, способных совершать посадку на ограниченной по размерам площадке на высоте более 3500 м.

Поскольку начался поверхностный перелив с расходом, не способным сорвать рыхлообломочный покров в понижениях, по которым происходил поверхностный перелив в 1963 г., было принято решение об удалении рыхлообломочных пород из двух «ложбин-каналов» поверхностного стока, и тем самым были созданы благоприятные условия для формирования

поверхностных каналов стока за счет тепла текущей по ним воды. Поверхностный перелив начался по западной ложбине, а затем и по восточной.

В ходе опорожнения водоема особое внимание уделялось контролю за перемещением тыловой части перемычки вследствие тепловой эрозии. Из-за большой скорости течения воды скорость пятящейся эрозии на тыльной части перемычки (и, как следствие, более интенсивного теплообмена между льдом и водным потоком) значительно превышала скорость углубления на пологом участке верхней части перемычки. В такой ситуации (при высоком уровне воды в озере) совмещение фронтальной и тыловой частей перемычки привело бы резкому возрастанию расхода прорывного паводка и последующему развитию катастрофического селевого процесса. Пятящаяся эрозия в восточном канале развивалась быстрее, чем в западном (глубина восточного канала, формировавшегося в тыловой части перемычки, достигала 10 м). Возникла угроза вскрытия туннеля углубляющимся каналом поверхностного стока, что неминуемо привело бы к формированию катастрофического селя.

Было принято решение о перекрытии восточного канала, что и было выполнено аварийной бригадой Казглавселезащиты путем заброски начального участка канала рыхлообломочной породой. Скорость пятящейся эрозии в западном канале снижалась путем защиты его дна крупными камнями. Благодаря принятым мерам уклон тыльной части перемычки был снижен с 60 до 8–10º. Тем самым удалось осуществить контролируемый сброс более 200 тыс. $м^3$ воды из водоема и обеспечить дальнейшую самопроизвольную сработку еще 220 тыс. $м^3$ воды. Средний расход воды через перемычку составил около 1,8 $м^3/с$ при максимальном 6–8 $м^3/с$. Каких-либо значимых селепроявлений не наблюдалось.

К 1 июля 1977 г. дальнейшее развитие канала стока прекратилось, так как канал в месте сочленения его с озерной котловиной в северо-восточной части практически приобрел высотную отметку дна этой котловины, которая была забронирована рыхлообломочными породами. В юго-восточной части котловины, имевшей большую глубину, осталось около 60 тыс. $м^3$ воды. Вход в ледяной туннель оставался под водой.

Несмотря на рекомендации специалистов КазНИГМИ продолжить опорожнение водоема путем удаления рыхлообломочных пород со дна опорожнившейся части озера, было принято решение о прекращении работ.

3 июля в результате вскрытия ледяного туннеля оставшийся объем воды в течение примерно 30 мин был сброшен (со средним расходом, близким к 30 $м^3/с$) по подземному каналу стока, соединявшемуся с поверхностным каналом стока примерно в 100 м от фронтальной части перемычки. В селевом врезе на древней морене сформировался мощный грязекаменный сель с расходом 700–1000 $м^3/с$. Дальность селевого выброса составила несколько километров, из-за относительно малого объема сель отложился в горной зоне.

Мероприятия по искусственному опорожнению озера на леднике Жарсай предотвратили формирование катастрофического селевого потока не менее мощного, чем тот, который привел к гибели озера Есик и причинил значительный ущерб г. Есику в 1963 г.

Таким образом, менее чем за 2 сут до предопределенного природой срока удалось предотвратить сель, последствия которого для г. Есика были бы катастрофическими.

Положительный опыт превентивного опорожнения озера на леднике Жарсай стимулировал продолжение работ по опорожнению озера №13 на леднике Советов. Стремление максимально использовать энергию попусков воды (для транспортировки твердых частиц, размеры которых меньше размеров частиц, формирующих отмостку) увеличивало риск нежелательного развития эрозионного процесса. Тем более что для осуществления этих попусков сооружались временные плотины из подручных материалов (как правило, это были мешки, заполненные песком и мелким щебнем), за которыми и накапливалась вода, использовавшаяся в дальнейшем при организации попусков. Не зря авторы [22] отмечали: «В настоящее время, обобщая полученные данные о состоянии моренно-ледниковых комплексов, опыт профилактических работ за рубежом, становится очевидным большая доля риска, которая присутствовала при производстве работ в 1970-х годах». В полной мере величина этого риска проявилась, когда в 1977 г. в результате прорыва озера №13, располагавшегося на леднике Советов, образовался катастрофический сель, нанесший большой материальный ущерб, при этом погибли люди [22, 52].

Следует отметить, что в первые десятилетия деятельности Казселезащиты по превентивному опорожнению селеопасных озер практическая реализация мероприятий осуществлялась без предварительного научного обоснования, проведения изыскательских работ и разработки проектов. Тем не менее за 25 лет было частично или полностью опорожнено около 20 водоемов. Описание работ по опорожнению 5 высокогорных озер приведено в [22]. К сожалению, публикации по обобщению накопленного Казселезащитой технологического опыта нам не известны.

Первым опытом социально-экономического обоснования необходимости проведения подобных работ, изучения геологического строения озерной перемычки, разработки технологической схемы и технических деталей процесса опорожнения озера стало превентивное опорожнение озера №6 на леднике Маншук Маметовой (бассейн р. Киши Алматы) в 1997 г.

К этому времени озеро №6, расположенное на высоте 3600 м над уровнем моря, было признано наиболее опасным объектом в Иле Алатау. Объем озера превысил 190 тыс. $м^3$ и его прорыв мог привести не только к полному разрушению плотины в урочище Мынжылки, сооруженной для задержания паводков, которые могли образоваться при прорыве водоемов моренно-ледникового комплекса Туйыксу, но и к заполнению и даже переполнению селехранилища в урочище Медеу, защищающего восточную половину г. Алматы от селей [22]. Из-за несоблюдения технологии опорожнения озера, предложенной КазНИИМОСК, выполнить в полной мере поставленные задачи не удалось.

Озеро №6 расположено на современной морене ледника Маншук Маметовой (рисунок 10.27), длина озера около 220 м, ширина – 157 м, максимальная глубина – 22 м. Озерная котловина образовалась в результате

Рисунок 10.27. Озеро №6 на леднике Маншук Маметовой

неравномерного таяния открытого и забронированного мореной ледника, ее размеры увеличиваются за счет вытаивания льда в придонной области и открытой части ледника, ограничивающего озеро на северо-востоке и востоке. Поскольку ложе котловины представлено мерзлыми породами, то фильтрация практически отсутствовала. Из озера вытекал ручей, расход потока определялся поступлением в озеро талых вод. Максимальный среднесуточный расход воды, поступавшей в озеро летом 1997 г., не превышал 100 л/с.

Жесткий затвор конструкции Алматыгидропроекта был установлен у истока ручья, мягкий затвор – в 43 м. Промежуток русла между затворами защищался от эрозионного воздействия водных потоков полотнищами из брезента.

Первые водные попуски с целью разрушения озерной перемычки осуществлялись с помощью мягкого затвора конструкции КазНИИМОСК. Недостаточная прочность брезента, из которого был изготовлен затвор, не позволила в полной мере выявить его достоинства. Затем попуски осуществлялись с помощью полужесткого затвора. Было осуществлено 7–9 попусков воды с селеформирующими расходами, обеспечившими срыв отмостки.

Затем полужесткий затвор конструкции КазНИИМОСК был заменен мягким затвором, предложенным Н. В. Поповым и, как казалось, более простым в изготовлении и эксплуатации. Эта конструкция не позволяла заполнять емкость более чем на 1 м по глубине в створе затвора. Модернизация конструкции затвора была предложена и осуществлена П. Н. Луганским (РОСО ГКЧС). После этого удавалось заполнять емкость до глубины 1,8 м. Затвор устанавливался и обслуживался бригадой из 10–13 человек,

время подготовки затвора к работе составляло 5 мин. Описываемый мягкий затвор рационально использовать можно только лишь в ситуациях, когда русло имеет крутые высокие борта, что позволяет уменьшить нагрузку на несущий трос.

Следует отметить, что время установки затвора не является фактором, определяющим целесообразность использования той или иной его конструкции, так как это время мало по сравнению с продолжительностью попусков, осуществляемых с помощью жесткого затвора, и промежутков времени между этими попусками.

Отмостка, сформировавшаяся в результате работ по опорожнению озера Казселезащитой в предшествующие годы, была сорвана, и произошло существенное углубление русла. Продольный профиль русла, образовавшегося в результате попусков с помощью мягких затворов с 26 июля по 14 августа (утро) 1997 г., показан на рисунке 10.28. Нетрудно видеть, что в этот период времени положение мягкого затвора сместилось на 10 м в направлении озера, а на расстояниях 68 м и более от жесткой плотины высотные отметки отложений превысили начальный уровень (26 июля 1997 г.). Ни в одном из положений затвора не было достигнуто проектное углубление русла.

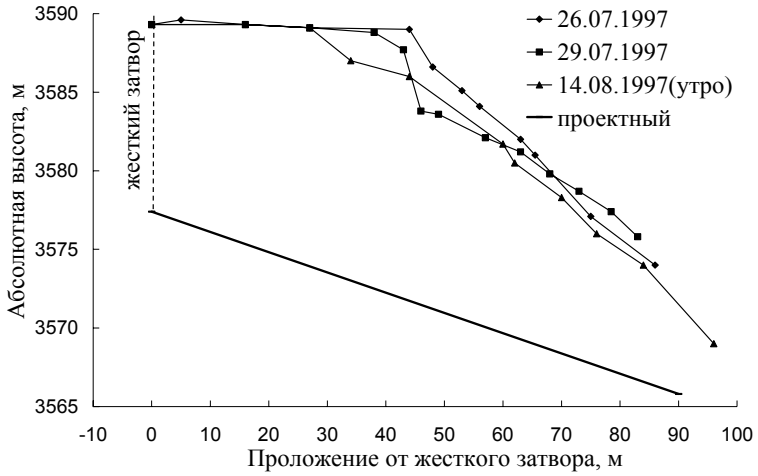


Рисунок 10.28. Продольные профили канала стока
из озера №6 (26 июля – 14 августа 1997 г.)

Вследствие того, что паводочные волны, формируемые с помощью мягкой плотины, не поддерживались попусками из озера путем открытия жесткого затвора, как это требовала технология опорожнения, происходило быстрое уменьшение характеристик паводочных волн. Транспортирующая способность потока падала и крупные фракции мореных грунтов отлагались в непосредственной близости от мягкого затвора.

9–10 августа 1997 г. впервые были осуществлены комбинированные попуски: попуски с помощью мягкого затвора дополнялись попусками

основного жесткого затвора. Сначала открывался только один затвор, максимальная подпитка при этом не превышала 1 $м^3/с$, впоследствии открывался и второй затвор, но большой валун, находившийся в непосредственной близости от второго затвора, не позволял реализовать возможности последнего. Мощная отмостка, сформировавшаяся ранее ниже мягких затворов, не разрушалась, вследствие чего произошел сильный размыв русла по ширине, причем отмостка еще более усилилась за счет крупных глыб, попавших в русло при обрушении бортов, вызванных размывом русла.

Продольный профиль русла, сформировавшийся в результате более чем сотни попусков, осуществленных с помощью мягкого затвора и нескольких комбинированных попусков, показан на рисунке 10.28 (утро 14 августа 1997 г.). Характер процессов, имевших место при попусках 13 августа 1997 г., свидетельствовал о практически полном прекращении эрозионных процессов.

В первой половине 14 августа 1997 г. была проведена разборка отмостки вручную на участке 55–80 м (рисунки 10.29, 10.30). В нижней наиболее крутой части этого участка на длине 10 м и ширине 3,5 м из поверхностного слоя были удалены камни размером более 0,15 м. На остальной части участка в отмостке было сформировано русло шириной 1–1,5 м и глубиной 0,5–0,7 м. Комбинированным попуском воды, осуществленным после описанных операций, было сорвано практически 60–70 % отмостки, обнажились локальные участки, сложенные относительно древней мореной.

15 августа 1997 г. были продолжены работы по разборке отмостки вручную, а также впервые были осуществлены взрывные работы по разрушению крупных глыб накладными зарядами. Первым же комбинированным попуском остатки отмостки были сорваны и в результате селевого

Рисунок 10.29. Участок русла до разборки отмостки

Рисунок 10.30. Участок русла после разборки отмостки

процесса большой объем рыхлообломочных пород, накопившихся в предыдущий период, был вынесен на зандровое поле. Столь же успешными были и последующие два попуска. Максимальное углубление русла достигало 4–5 м, углубление у конца мягкого затвора – 2–3 м. Профиль русла, образовавшегося 15 августа 1997 г., приведен на рисунке 10.31.

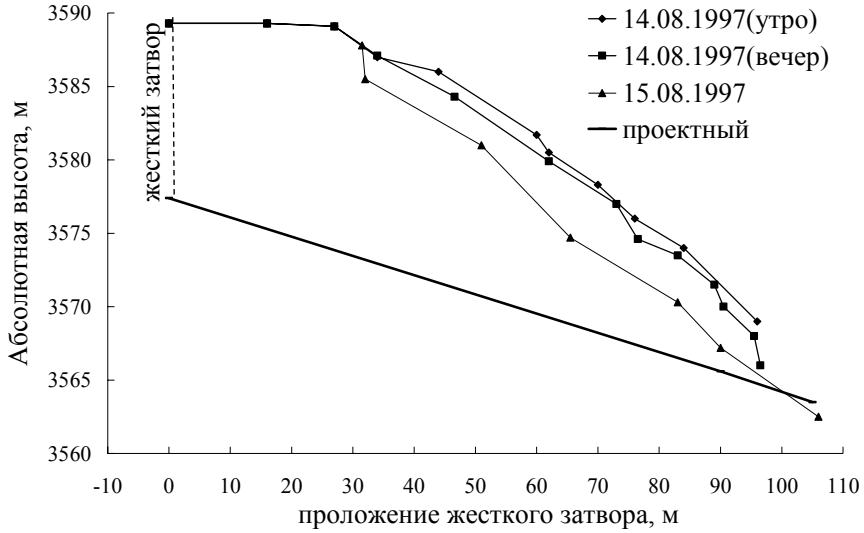


Рисунок 10.31. Продольные профили канала стока
из озера №6 (14–15 августа 1997 г.)

Как следует из рисунка 10.31, высотная отметка положения русла в створе мягкого затвора 15 августа 1997 г. еще не соответствовала проектному значению. Однако 16 августа 1997 г. мягкий затвор был перенесен в направлении озера на 10 м, и без разборки образовавшихся фрагментов отмостки комбинированные попуски были продолжены. В результате первых же попусков возникшие ранее углубления в русле были заполнены крупными фракциями грунта морены и образовалась отмостка, разрушить которую не удалось до окончания работ. Продольный профиль русла по мере переноса створов мягкого затвора в направлении озера выполаживался.

Объясняется это тем, что работы по разрушению отмостки, осуществлявшиеся вручную и с помощью взрывов, проводились не на крутом периферийном участке русла, а пологом, прилегающем к мягкому затвору. Профиль, образовавшийся к 2 сентября 1997 г., приведен на рисунке 10.32.

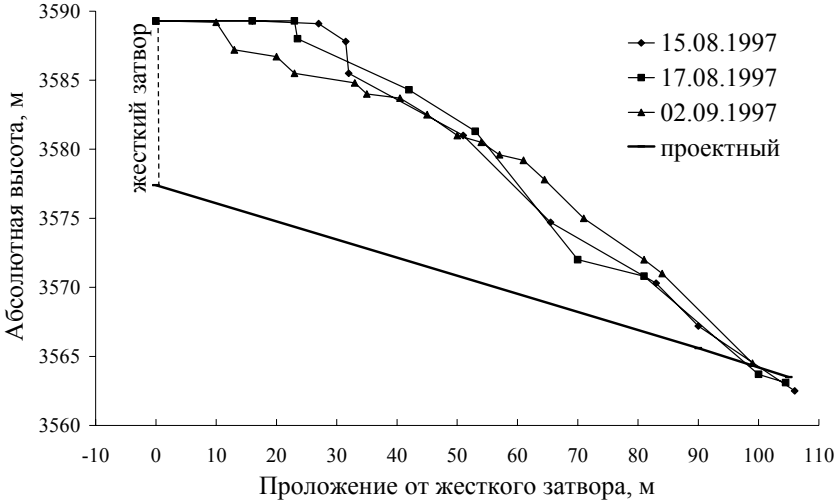


Рисунок 10.32. Продольные профили канала стока
из озера №6 (15 августа – 2 сентября 1997 г.)

В последующем работы по углублению озера осуществлялись вручную, крупные глыбы дробились взрывами; относительно более мелкие фракции, перемещаемые 1–3 рабочими, складировались на склонах в непосредственной близости от тальвега русла. В ходе попусков с небольшими расходами даже незначительное углубление русла (15–30 см) приводило к обрушению этих камней, и операции по их складированию вновь продолжались. Продольные профили русла, сформировавшиеся на 13 сентября 1997 г., приведены на рисунке 10.33.

Большое количество камней, скопившихся на бортах русла (рисунок 10.34), не позволило понизить высотную отметку базиса эрозии с помощью описанной методики. В результате более чем двухмесячных работ удалось углубить озерную перемычку на 2,6±0,1 м вместо 6 м, как это предусматривалось скорректированным проектом. Продольные профили русла на 20 сентября 1997 г. приведены на рисунке 10.35.

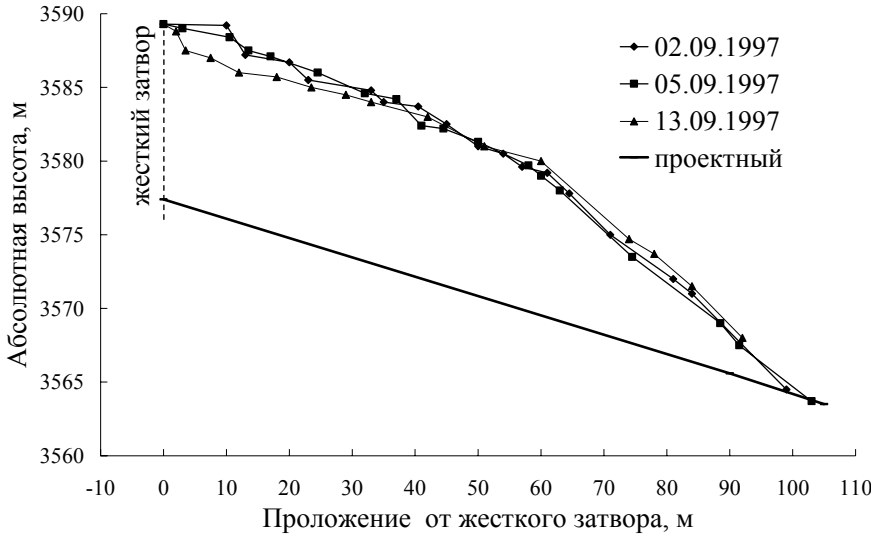


Рисунок 10.33. Продольные профили канала стока
из озера №6 (2–13 сентября 1997 г.)

Рисунок 10.34. Складирование камней на бортах канала стока

В ходе работ был проведен эксперимент по очистке русла от крупных камней (путем смачивания и размыва прилегающих к нему склонов) с использованием мотопомпы. Предполагалось, что в ходе этих операций русло заполнится плотной селевой массой, которая должна была прийти в движение, увлекая за собой крупные камни, находившиеся в русле, при водном попуске. Из-за отсутствия опыта подобных работ в течение двух

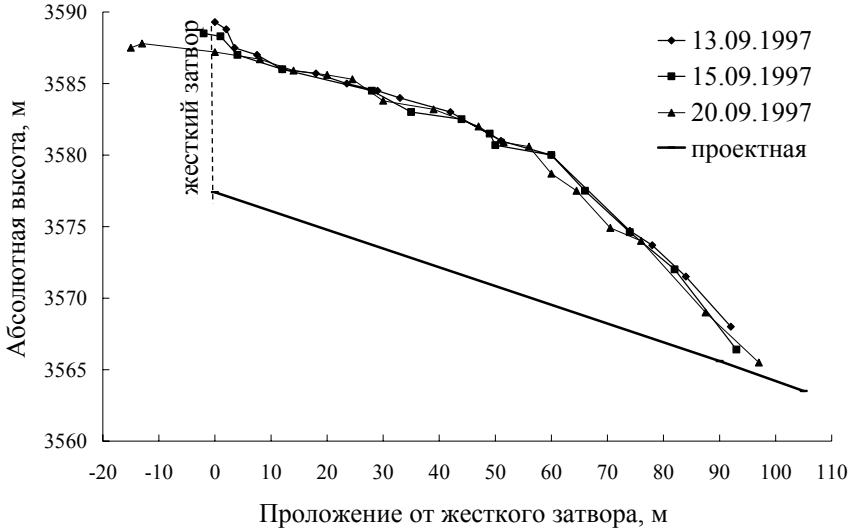


Рисунок 10.35. Продольные профили стока
из озера №6 (13–20 сентября 1997 г.)

часов из общего времени, отпущенного на эксперимент, склон увлажнялся по всей площади экспериментального участка. Это приводило к тому, что крупные камни скатывались в русло, а суспензия и относительно более крупные частицы формировали конус выноса, прилегающий к руслу, не заполняя промежутки между крупными фракциями. Анализ происходивших процессов привел к выводу, что для получения необходимой однородной селевой массы следует осуществлять размыв грунта на локальных площадях, при этом формирующаяся селевая масса заполняла бы русло, как это планировалось перед началом эксперимента. Недостаток времени, нестабильная работа и поломки мотопомпы, неудачный выбор методики формирования селевой массы в первой фазе эксперимента не позволили получить однозначный ответ на вопрос: насколько эффективен такой способ?

В то же время стало ясно, что описанные действия являются эффективным способом приведения склонов в устойчивое состояние (рисунок 10.36). За 2,5 ч была обеспечена безопасность работы в дальнейший период времени на участке длиной 15–20 м без применения опасного и малопроизводительного ручного труда по оборке склонов (рисунок 10.37).

Отрицательное последствие эксперимента (заполнение русла крупными камнями) было устранено силами двух человек в течение 5 ч. Эксперимент и устранение его отрицательных последствий осуществлялись в основном в нерабочее время.

Результаты теоретических исследований и практических работ по опорожнению озер, перемычки которых сложены мерзлыми и талыми грунтами, позволили сделать следующие выводы:

1. Гидравлический метод разрушения перемычек и перенос образующихся при этом рыхлообломочных пород может успешно применяться в

Рисунок 10.36. Склон, оборка которого осуществлялась с помощью мотопомпы

Рисунок 10.37. Оборка склонов вручную

целях уменьшения селевой опасности. Метод обладает высокой экономической эффективностью, не требует использования тяжелой землеройной техники, производство работ практически безопасно. Эффективное использование гидравлического метода возможно при строгом соблюдении технологии проведения работ, детальном анализе нестандартных ситуаций, возникающих в ходе эрозионных процессов.

2. Главной причиной того, что в ходе работ не удалось опорожнить озеро до проектной величины, является то, что систематически не выполнялись главные требования, лежащие в основе гидравлического метода разрушения перемычек:

при всех положениях мягкого затвора углубление русла должно производиться, как минимум, до проектных значений;

уклон русла в нижнем бьефе мягкого затвора должен превышать 13°;

расход и объем водного паводка должны превышать критические значения для конкретных геолого-геоморфологических ситуаций; характеристики паводковой волны должны обеспечивать вынос всех фракций, слагающих русло, за проектную отметку; исключением могут быть лишь отдельные крупные глыбы, которые должны дробиться с помощью ВВ, но и они после дробления должны выноситься за проектную отметку;

в 1997 г. при опорожнении озера №6 до 9–10 августа попуски осуществлялись только с помощью мягкого затвора, что не обеспечивало необходимые объем и расход воды для выноса наносов. Комбинированные попуски оказались неэффективными, за исключением попусков 14–15 августа 1997 г., из-за ошибочного выбора участков русла, на которых разрушались отмостки вручную и с помощью ВВ, а также из-за того, что характеристики канала в нижнем бьефе жесткого затвора не соответствовали проектным требованиям.

3. Выстилание русла брезентовыми полотнищами – эффективный способ защиты русла от эрозионного воздействия водного потока при наклоне русел менее 10° и расходе потока до 3 $м^3/с$ (при больших упомянутых величинах работа не проводилась).

4. Эффективность мягкого затвора определяется расходом водного паводка, формируемого с его помощью, и объемом воды, аккумулируемой мягким затвором (рисунок 10.38). При относительно малых объемах воды расход потока уже на первых десятках метров уменьшается и при наличии крупных частиц в составе транспортируемых наносов происходят их отложение и формирование отмостки.

5. Применение мягкого затвора для разрушения отмостки, образуемой малыми расходами, а также отмостки, целостность которой нарушена разборкой вручную и (или) с помощью ВВ, эффективно только в сочетании с паводками, формируемыми жесткими затворами.

6. Использование жесткого затвора – эффективный способ аккумуляции воды в озерной котловине с целью разрушения перемычек селеопасных озер гидравлическим методом. С его помощью легко достигается уровень аккумулируемой воды, получить который с помощью мягкого затвора очень сложно или невозможно. В особой мере последнее относится к ситуациям,

Рисунок 10.38. Пример неэффективного использования мягкого затвора

когда берега русла пологи или затвор устанавливается в акватории опорожняемого озера. Для установки жесткого затвора требуется бригада не более 6 человек, время установки – 4–5 ч. Жесткий затвор, как показала практика, успешно сопротивляется динамическим нагрузкам, в частности воздействию волн, образуемых при обрушении ледовых глыб в озерную котловину. Конструкция жесткого затвора позволяет предотвращать несанкционированные попуски, могущие создать катастрофические ситуации.

7. При ликвидации селевой опасности не удалось получить опыт по установке жесткого и мягкого затворов в акватории озера. Однако имеются основания утверждать, что после незначительной модернизации установка и эксплуатация жесткого затвора в акватории озера окажутся значительно проще, чем установка и эксплуатация мягкого затвора. Преимущество жесткого затвора увеличивается с ростом расхода, который должен обеспечивать затвор.

Рельеф в районе перемычки, сформировавшийся на 30 сентября 1997 г., существенно отличался от такового, который должен был иметь место при запланированном опорожнении озера на 6 м. Малый уклон русла в районе перемычки, высокие (до 30 м) неустойчивые склоны, примыкающие к узкому руслу (0,5–1 м), наличие трещин отрыва на большей части правого склона создавали потенциально опасную ситуацию (рисунок 10.39). Обрушения с объемом даже первые десятки кубометров могли повысить высотные отметки гребня перелива из озера на 2–3 м, т.е. высотная отметка его превысит значение, имевшее место до начала работ 1997 г. Причем образовавшаяся перемычка может состоять из легко размываемого грунта.

Рисунок 10.39. Канал стока на выходе из озера по завершению работ в 1997 г. (по состоянию на 29 сентября 1997 г.)

Для предотвращения катастрофической ситуации необходимо в период абляции вести круглосуточное наблюдение за состоянием перемычки и принимать меры, исключающие возможность неконтролируемого разрушения перемычки.

Работы по опорожнению озера №6 в 1997 г. следует считать промежуточным этапом, поэтому сложившуюся ситуацию можно трактовать как издержки, вызванные ошибками, обусловленными отступлениями от оптимальной технологии.

В 1998–2009 гг. ГУ «Казселезащита» осуществляла расчистку и углубление канала стока из озера №6 без привлечения механизации, однако объем озера продолжал увеличиваться и в момент максимального его заполнения составлял 242 тыс. $м^3$ [91]. С целью снижения селевой опасности в 2010 г. была сооружена одна нитка сифонного водовода, позволившая дополнительно снизить уровень воды в озере примерно на 3 м.

До 2010 г. в осенне-зимние периоды уровень воды в озере сохранялся на высотных отметках гребня поверхностного перелива, вода в озере покрывалась льдом. Неизменность уровня объяснялась тем, что озеро находилось в ледяной чаше, в которой оно и развивалось.

В осенне-зимний период 2010–2011 гг. уровень воды в озере уменьшился примерно на 3 м, а в осенне-зимний период 2011–2012 гг. произошло его практически полное опорожнение, что свидетельствовало о формировании подземных каналов стока из озера. Озеро №6 перешло в категорию нестационарных озер, вероятность прорыва которых с катастрофическими последствиями превышает таковую стационарных [22].

Наиболее вероятным представляется следующий сценарий событий (при условии невмешательства человека), связанных с озером №6. С увеличением сечения подземного канала стока озерная котловина перестанет заполняться водой в летний период времени. Высотная отметка гребня перелива канала поверхностного стока увеличится за счет оползневых процессов на несколько метров.

Даже при относительно малых расходах талых вод, поступающих в озерную котловину, сечение подземного канала будет расти за счет вытаивания льда, моренные грунты увлажняться. Как это происходит с нестационарными озерами, рано или поздно подземный канал перекроется и котловина заполнится водой. Объем воды может составить 200–300 тыс. м^3. Вскрытие канала стока приведет к формированию паводка, который может трансформироваться в катастрофический сель.

Предметом дискуссии является минимально допустимый объем озера №6. При этом следует иметь в виду, что даже при прорыве 10 тыс. м^3 воды на древней морене ледника Маншук Маметовой сформируется сель с объемом около 200 тыс. м^3, который заполнит водохранилище в урочище Мынжылки и тем самым создаст условия для образования катастрофических селей при прорыве водоемов на ледниках Молодежный и Туйыксу.

10.6. Оценка селевого риска и целесообразности превентивных работ по опорожнению поверхностных водоемов

Селевая опасность D_m озера №6 может быть оценена как

$$D_m = HSYV\,, \tag{10.1}$$

где H – вероятность прорыва моренного озера за определенный период времени; S – вероятность прорыва моренного озера с расходом, превышающим критическое для селеформирования значение; Y – вероятность достижения селем территории г. Алматы с катастрофическим расходом; V – уязвимость.

Уязвимость определяется по формуле

$$V = P_{восст} : P_{полн}\,, \tag{10.2}$$

где $P_{восст}$ – стоимость восстановления объекта; $P_{полн}$ – стоимость объекта на момент воздействия селя.

С учетом завершающей стадии развития озера вероятность его прорыва в ближайшие 10 лет может быть принята равной 1. При этом объем озера с учетом увлажнения морены может составить 600–700 тыс. м^3.

Вероятность прорыва озера S с расходом, превышающим критическое для селеформирования значение, в самом благоприятном случае будет не меньше 0,1 (все крупные моренные озера Иле Алатау прорывались с селеформирующим расходом: Жарсай – 1958 и 1963 гг.; Киши Алматы – 1973 г.; Улькен Алматы – 1977 г.; т.е. S=1).

При прорыве озера с объемом 600 тыс. м^3 образуется сель с объемом не менее 12 млн м^3. Такой сель разрушит восточную половину г. Алматы

минимум до проспекта Райымбека, т.е. Y=1. Поскольку разрушение не будет носить тотальный характер, примем значение уязвимости V=0,1.

При принятых значениях факторов, определяющих селевой риск, селевая опасность D_m =1×0,1×1×0,1=0,01.

Для оценки целесообразности опорожнения озера №6 определим риск в денежном выражении. По нашей оценке, стоимость недвижимости и инфраструктуры, расположенной на восточной половине г. Алматы, составляет не менее 10^{10} USD. Тогда риск в денежном выражении

$$R_D = D_m P_{полн} = 10^8 \text{ USD}. \qquad (10.3)$$

Стоимость создания канала стока, исключающего возможность заполнения водой котловины озера №6, не превысит 500 тыс. USD.

В рассмотренной ситуации возможные потери превысят затраты на создание канала стока в 100–200 раз. Такую оценку можно считать минимальной, так как при расчете потерь не учитывалась утраченная прибыль, вызванная тем, что в случае катастрофы г. Алматы перестанет на долгие годы быть финансовым центром страны, а также гибель многих тысяч людей. Не учитывалась стоимость восстановления плотины в урочище Медеу (50–100 млн USD), а также то обстоятельство, что г. Алматы на период строительства плотины (несколько лет) останется без защиты от селей. Не принималась во внимание и возможность развития цепного селевого процесса на древней морене ледника Маншук Маметовой, вероятность которого весьма велика. При этом объем селя составит десятки миллионов кубометров, а уязвимость примет значение, близкое к единице.

В создавшейся ситуации задержка с превентивным опорожнением озера №6 является, по нашему мнению риском, не оправданным как по экономическим, так и по моральным соображениям.

При H=1; S=1; Y=1; V=0,1; $P_{полн}$=10^{10} USD; R_D =10^9 USD.

К сожалению, в настоящее время отсутствуют нормативные документы, обусловливающие выбор первоочередных объектов активного воздействия на факторы, определяющие селевую активность гляциального генезиса, методов проведения превентивных мероприятий, обеспечивающих их безопасность и т.д. Знаменательным может стать факт признания руководством МЧС того, что «… бессистемный подход к реализации программы превентивных мероприятий значительно снижает ее эффективность» [22].

Высокий уровень селевой активности гляциального генезиса на северном склоне Иле Алатау, вызванный дегляциацией хребта, обусловленной глобальным потеплением климата, будет сохраняться до тех пор, пока не растают долинные ледники и большая часть объема погребенного льда.

Глава 11

СЕЛЕТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Методы защиты от селей зависят от многих факторов: генезиса селей, их объема и максимального расхода, свойств селевой массы, взаимоположения селевых очагов, пути движения селей, а также мест естественного отложения селей и характеристик объектов, которые могут быть подвержены воздействию селей, экономических и социальных потерь, периода времени, в течение которого может быть нанесен ущерб и т.д.

Главная роль в комплексе селезащитных мероприятий, осуществлявшихся в Казахстане, отводилась крупным плотинам, возводимым в горных долинах. На их строительство выделялась львиная доля ассигнований, предназначавшихся на селезащитные мероприятия. Проектирование и строительство селезащитных плотин осуществлялось в условиях дефицита надежной информации о реальной селевой опасности и средств, выделяемых на селезащитные мероприятия.

Защита от селей населенных пунктов и объектов хозяйственного назначения, расположенных в долинах горных рек и предгорной зоне северного склона Иле Алатау, осуществляется различными способами: с помощью селепредотвращающих, стабилизирующих, селезадерживающих, селенаправляющих, селепропускных сооружений, а также превентивных мероприятий.

Комплекс инженерных сооружений, возведенных Казселезащитой с целью снижения ущерба, который может быть нанесен селями г. Алматы, экспертами ООН оценивается примерно в 200 млн USD [22].

Селепредотвращающие сооружения. Задержание водных паводков в водохранилищах, создаваемых в высокогорной зоне, является одним из реальных и эффективных способов предотвращения или уменьшения ущерба, наносимого селями. Наибольший экономический эффект достигается правильным выбором места возведения плотины и объема задерживаемого ею воды. Первый проект водохранилища с объемом 35 тыс. $м^3$, создаваемого с помощью габионной плотины в урочище Мынжылки, был разработан и осуществлен по заданию Алматинского горисполкома в 1964 г. Тело плотины было выполнено из валунов и гальки, укрепленных металлической сеткой путем образования плоских габионов. Водосливная часть плотины и ее нижний бьеф были укреплены железобетонными плитами. Расчетная пропускная способность водослива составляла 25 $м^3/с$, высота плотины – 6 м. В 1970 г. планировалось нарастить плотину до высоты 9 м, при этом объем водохранилища увеличивался до 70 тыс. $м^3$. Стоимость строительства плотины составила 170 тыс. рублей [143, 246]. Следовательно, стоимость задержания 1 $м^3$ воды была близка к 2,5 $руб/м^3$.

В 1973 г. при прорыве озера №2, расположенного на моренно-ледниковом комплексе Туйыксу, объем прорывного паводка превысил объем водохранилища, образуемого габионной плотиной. Это привело к переливу воды через гребень плотины и ее разрушению в центральной части. Существенной роли в селеформировании разрушение этой плотины не сыграло, поскольку расход прорывного паводка, образовавшегося в результате самопроизвольного опорожнения озера №2 на леднике Туйыксу, превышал расход воды при разрушении плотины [159, 218].

В последующие годы на месте частично разрушенной габионной плотины была построена насыпная плотина с бетонным лотком аварийного водосброса и двумя щелевыми водовыпусками (рисунок 11.1). Высота плотины составляет 17 м, длина – 300 м, объем селехранилища – 230 тыс. м^3 [218]. Назначение плотины – предотвращение образования селей гляциального генезиса путем перехвата водных паводков от прорыва моренных и ледниковых озер ледника Туйыксу, выше Малоалматинского селевого очага и постепенной их сработки малыми, неселеобразующими расходами.

Рисунок 11.1. Плотина в урочище Мынжылки

Опыт определения характеристик селя 1973 г. свидетельствует о том, что в ходе селеформирования 1 м^3 воды трансформировался в 20 м^3 селевой массы. Поскольку стоимость сооружения плотины в урочище Медеу составила около 50 млн рублей [143], следовательно, стоимость задержания 1 м^3 селевой массы около 12 рублей. Нетрудно подсчитать, что предотвращение селеформирования путем задержания паводков в высокогорной зоне бассейна р. Киши Алматы примерно в 5 раз дешевле, чем задержание селя плотиной в урочище Медеу.

К недостаткам этого селепредотвращающего сооружения следует, прежде всего, отнести небольшой объем водохранилища по сравнению с потенциальными возможностями моренно-ледникового комплекса р. Киши Алматы. При формировании грязекаменного селя выше створа плотины эффективность этого сооружения окажется крайне низкой.

Стабилизирующие сооружения. Для предотвращения возникновения или развития селей построен каскад стабилизирующих запруд в логу Дикий

и на р. Улькен Алматы (бассейн р. Улькен Алматы), а также на реках Левый Шымбулак, Кимасар и Есентай (бассейн р. Киши Алматы).

Каскад стабилизирующих запруд в логу Дикий (14 земляных запруд высотой 1,3–1,5 м) построен для нейтрализации эрозионных процессов, обусловленных нарушением растительного покрова при прокладке напорного туннеля ГЭС-2 [159]. Эрозионные процессы были остановлены, это привело к прекращению селевой деятельности.

Наиболее крупное стабилизирующее сооружение протяженностью 10,4 км, состоящее из 205 барражей и 2 отстойников суммарной емкостью 80 тыс. $м^3$, построено на р. Улькен Алматы. Отстойники разделены бетонными водосливными плотинами, снабженными затворным механизмом для регулирования сброса воды [1] (рисунок 11.2).

Рисунок 11.2. Стабилизирующее сооружение на р. Улькен Алматы

Каменные запруды в русле р. Левый Шымбулак построены в 50-х годах XX века с целью уменьшения селевой активности Левого Шымбулакского селевого очага (рисунок 11.3). Обследование запруд показало, что на протяжении более полувека на этом участке русла поверхностный сток отсутствовал, хотя на некоторых участках русла прослушивается шум, создаваемый подземным потоком. Подземный поток выклинивается на дневную поверхность в нескольких сотнях метров, давая начало р. Шымбулак.

Для защиты объектов, расположенных в урочище Медеу ниже спорткомплекса, от селей дождевого генезиса в нижней части долины р. Кимасар проведены работы по стабилизации русла р. Кимасар. Проектирование стабилизированного русла р. Кимасар проводилось в комплексе с водосбросным трактом, состоящим из системы барражей (60 шт.) и отстойников.

Рисунок 11.3. Запруды в русле Левого Шымбулакского селевого очага

Пропускной расход стабилизированного русла составляет 17,1 м^3/с, протяженность – 1260 м, глубина русла – 3 м, ширина по дну – 6 м, ширина по верху – 11,2 м [1]. Следует отметить, что комплекс стабилизирующих и селепропускных сооружений в бассейне р. Кимасар (рисунок 11.4) нельзя считать завершенным, так как основной участок формирования и развития селей находится выше этого комплекса.

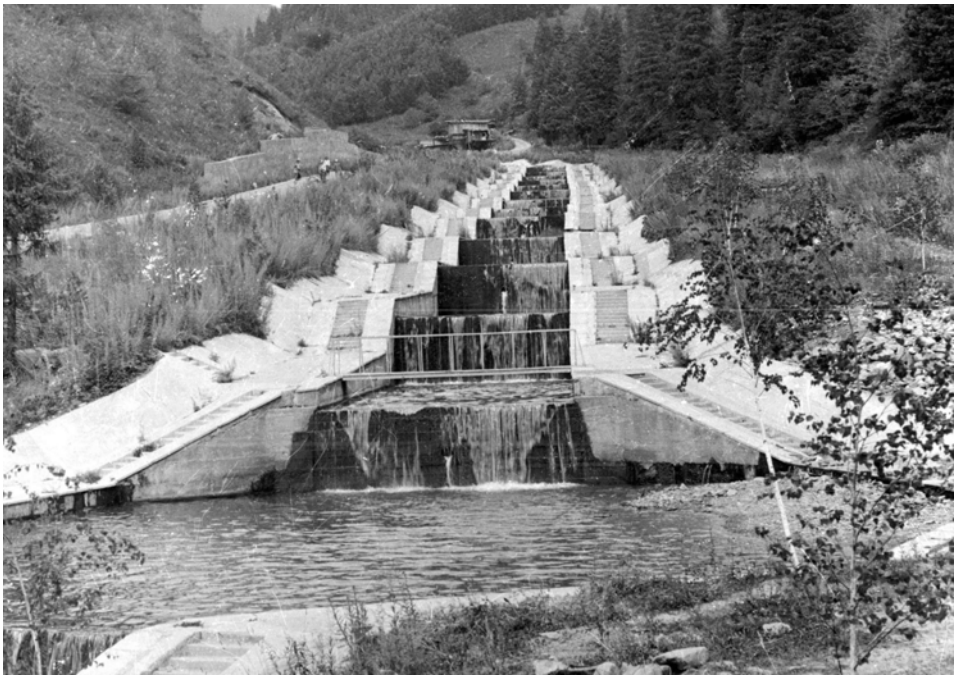


Рисунок 11.4. Комплекс стабилизирующих и
селепропускных сооружений в бассейне р. Кимасар

Рисунок 11.5. Наносоотстойный бассейн на р. Есентай (выше проспекта аль-Фараби)

На р. Есентай проведена стабилизация русла общей протяженностью около 5 км (88 барражей). Выше проспекта аль-Фараби сооружен наносоотстойный бассейн емкостью около 250 м^3, снабженный механизмами, обеспечивающими контролируемый сброс воды до 25 м^3/с [1] (рисунок 11.5).

Сквозные стальные и железобетонные селезадерживающие плотины. Во второй половине XX века большое внимание в СССР, прежде всего в Грузии, Казахстане и на Северном Кавказе, уделялось проектированию и строительству стальных и железобетонных сквозных сооружений. К главным достоинствам этих сооружений относили:

возможность промышленного изготовления элементов конструкции плотин, что значительно упрощало процесс их сооружения в условиях высокогорья, сводившегося к сборке плотин из готовых элементов;

способность таких конструкций задерживать наиболее крупные фракции твердого компонента селевой массы, пропуская остальную массу потока, и тем самым уменьшать разрушительную способность селя и вероятность образования заторов, прорыв которых мог приводить к значительному, пусть и кратковременному, увеличению расхода селевого потока;

способность гибких пространственных конструкций смягчать ударное воздействие крупных валунов и глыб, предохраняя все сооружение от разрушения.

Стальные и железобетонные сквозные сооружения, а также сквозные сетчатые сооружения используются в некоторых странах для уменьшения эрозионного углубления русел горных рек и формирования при этом относительно небольших селей (рисунки 11.6, 11.7). Однако какие-либо меры по защите этих сооружений в ходе перелива селевой массы не предусмотрены. Отсутствуют и пути подъезда техники для расчистки заполненных сооружений. Опыт эксплуатации этих сооружений в условиях повышенной селевой активности отсутствует.

Рисунок 11.6. Сквозное сетчатое сооружение в Швейцарских Альпах (фото из [249])

Рисунок 11.7. Система сквозных сетчатых сооружений в Швейцарских Альпах (фото из [249])

Рисунок 11.8. Сквозное сетчатое сооружение на р. Сарысай

Сквозное сетчатое сооружение на р. Сарысай (Иле Алатау) представляло собой систему колец диаметром 1 м, выполненных из арматурной стали толщиной 25 мм (рисунок 11.8). Высота этого сооружения составляла 15 м [159, 250].

В 2013 г. сель с расходом первые десятки кубометров в секунду и продолжительностью несколько минут полностью разрушил это сооружение.

Из-за неспособности противостоять воздействию даже незначительных селей такие сооружения практического значения (как защитные сооружения) не имеют и в настоящее время могут рассматриваться лишь как этап развития селезащитных сооружений.

Сквозные сетчатые сооружения целесообразно применять при незначительном объеме селей и экономической целесообразности расчистки и вывоза селевых отложений в места их складирования.

В 1964–1966 гг. в бассейне р. Киши Алматы было построено 5 стальных сквозных селезащитных сооружений по проектам Казахского филиала института «Гидропроект» им. С. Я. Жука. Назначение стальных сквозных селезащитных сооружений, располагавшихся выше каменно-набросной плотины в урочище Медеу, – стабилизация русла р. Киши Алматы [246], а возле дома отдыха №2 Совета Министров КазССР и лесничества – задержание селей, формирующихся на реках Кимасар, Бедельбай и Батарейка.

Стальная сквозная плотина в районе турбазы «Горельник» была разрушена селем в 1973 г. К недостаткам стальных сквозных плотин, расположенных в районе дома отдыха №2 Совета Министров КазССР и лесничества,

по нашему мнению, можно отнести чрезмерно большую сквозность. При проектировании этих сооружений принимались во внимание, прежде всего, сели, формирующиеся в высокогорной зоне, твердый компонент которых представлен в основном ледниковыми отложениями. После возведения каменно-набросной плотины в урочище Медеу ситуация изменилась. Твердый компонент селей, формирующихся в бассейнах рек Кимасар, Бедельбай и Батарейка, выполнен в основном склоновыми отложениями и не содержит крупных включений (глыб), типичных для селей, твердый компонент которых представлен ледниковыми отложениями. Вследствие этого сели среднегорья могут практически беспрепятственно проходить через сквозные сооружения, расположенные возле дома отдыха №2 Совета Министров КазССР и лесничества.

Крупные железобетонные сквозные плотины в Казахстане построены в долинах р. Есик (высота – 18 м, длина – 118 м, ширина – 33 м, объем селехранилища – 1,5 млн м^3) и р. Каскелен (высота – 19,8 м, длина по гребню – 109,2 м, длина по основанию – 69,6 м, ширина по основанию – 48 м, объем селехранилища – 2,2 млн м^3) (рисунки 11.9, 11.10). Относительно небольшая железобетонная сквозная плотина построена на р. Акжар (приток р. Аксай). Высота плотины составляет 9 м, объем селехранилища – 112 тыс. м^3 [90].

Если железобетонная сквозная плотина в долине р. Есик играет вспомогательную роль, так как ниже по течению реки возведена насыпная плотина, образующая селехранилище с объемом 12,8 млн м^3, то железобетонная сквозная плотина на р. Каскелен призвана защищать от воздействия катастрофических селей г. Каскелен.

Опыт эксплуатации железобетонных сквозных плотин показал, что они не гарантируют защиту от грязекаменных селей, твердый компонент которых содержит крупные фракции. В Кабардино-Балкарии для защиты г. Тырныауза от катастрофических селей была построена железобетонная сквозная плотина высотой 28 м, объем селехранилища составлял около

Рисунок 11.9. Железобетонная сквозная плотина в бассейне р. Есик

Рисунок 11.10. Железобетонная сквозная плотина в бассейне р. Каскелен

4 млн м^3. Строительство плотины завершилось весной 1999 г., а в августе того же года эта плотина была разрушена катастрофическим селем гляциального генезиса (рисунки 11.11, 11.12). Первые же удары глыб и крупных

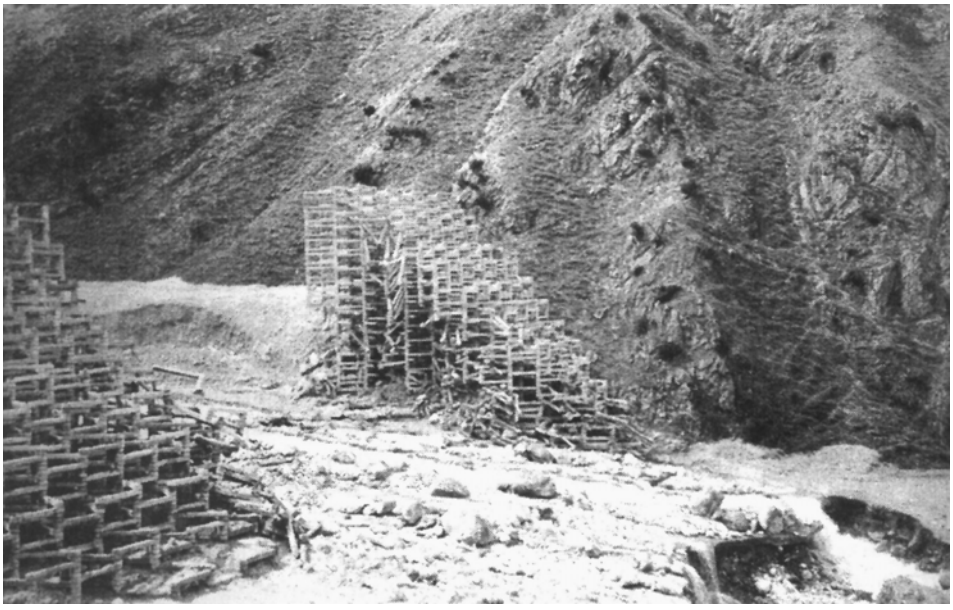


Рисунок 11.11. Плотина на р. Герхожансу, разрушенная селевым потоком 20 августа 1999 г. (фото из [251])

Рисунок 11.12. Фрагмент плотины, приведенной на рисунке 11.11

валунов раздробили нижние секции в средней части плотины. Этого воздействия оказалось достаточно, чтобы она потеряла устойчивость и рухнула, после чего ее обломки снесло вниз по течению. Плотина вышла из строя, не оправдав своего назначения, и не подлежит восстановлению. Селем был нанесен большой ущерб и г. Тырныауз [251].

Итак, сквозные плотины по техническим и экономическим характеристикам уступают насыпным плотинам, не защищенным от разрушения при переливе селевой массы или воды через их гребень.

Практика эксплуатации сквозных селезащитных сооружений показывает, что их основное назначение (задержать крупные и пропустить мелкие фракции твердого компонента селевой массы) невыполнимо. Создатели сквозных селезащитных сооружений не учитывали то обстоятельство, что сквозная плотина подобна неподвижному ситу. Как известно, сито пропускает относительно мелкие фракции и задерживает крупные только тогда, когда его трясут. Задержание крупных фракций приводит к уменьшению сквозности плотины, а это обусловливает задержание уже более мелких фракций и т.д. до тех пор, пока сквозная плотина не превратится в глухую. Это происходит уже в считанные секунды первого селя. Описанный эффект хорошо иллюстрируется фотографией сквозной плотины, построенной на выходе из селевого очага Акжар (Иле Алатау) (рисунок 11.13).

Элементы конструкции сквозных селезащитных сооружений не выдерживают воздействия грязекаменной массы, если размеры фракций его твер-

Рисунок 11.13. Железобетонная сквозная плотина
на выходе из селевого очага Акжар (вид с нижнего бьефа)

дого компонента превышают 1–1,5 м. Примером быстрого разрушения стальной сквозной плотины может служить плотина, располагавшаяся в створе турбазы «Горельник». По свидетельству наблюдателя гидрологического поста на р. Сарысай, при прохождении селя на р. Киши Алматы 15 июля 1973 г. сквозная плотина была разрушена в течение нескольких секунд [159] (рисунок 11.14).

Рисунок 11.14. Остатки сквозной плотины на р. Киши Алматы у турбазы «Горельник»

Частичное разрушение стального сквозного селезащитного сооружения в результате столкновения с ним грузового автомобиля свидетельствует о недостаточной его прочности (рисунок 11.15).

Рисунок 11.15. Стальная сквозная плотина в бассейне р. Киши Алматы, частично разрушенная в результате столкновения с ней грузового автомобиля

Селезадерживающие сооружения. Мощные сели, формирующиеся в горных районах Казахстана, несущих (несших в прошлом) оледенение, привели к тому, что защита объектов осуществляется преимущественно с помощью плотин, образующих селехранилища. На северном склоне Иле Алатау построены насыпные плотины (глухие) в бассейнах рек Есик и Киши Алматы и насыпная плотина, снабженная поверхностным водосбросом в бассейне р. Узынкаргалы; ячеистые железобетонные плотины, снабженные поверхностным водосбросом – в бассейнах рек Талгар, Улькен Алматы и Карагалинка; сквозные плотины – в бассейнах рек Есик, Киши Алматы и Каскелен.

Первым крупным селезадерживающим сооружением в Казахстане стала каменно-набросная плотина в урочище Медеу, призванная защитить восточную часть г. Алматы от катастрофических селей дождевого генезиса, формирующихся в бассейне р. Киши Алматы (рисунок 11.16). Принятый при проектировании объем селехранилища, равный 6,2 млн м^3, должен был обеспечить задержание одного селя дождевого генезиса повторяемостью 1 раз в 10 000 лет. Уникальность этой плотины заключалась в том, что она возводилась с помощью направленных взрывов. Суммарная масса взрывчатых веществ составила 9,4 тыс. т, однако проектная высота плотины не была достигнута. В 1972 г. плотина была отсыпана на полный профиль. В 1973 г. плотина задержала сель гляциального генезиса с объемом 3,8 млн м^3, возможность формирования которого при проектировании плотины не принималась во внимание.

После события 1973 г. плотина в урочище Медеу была наращена до высоты 150 м (рисунок 11.17). Ее длина по гребню составляет 530 м, ширина по гребню – 20 м, ширина по основанию – 800 м, площадь основания – 424 тыс. м^2, объем селехранилища – 12,6 млн м^3. В тело плотины уложено

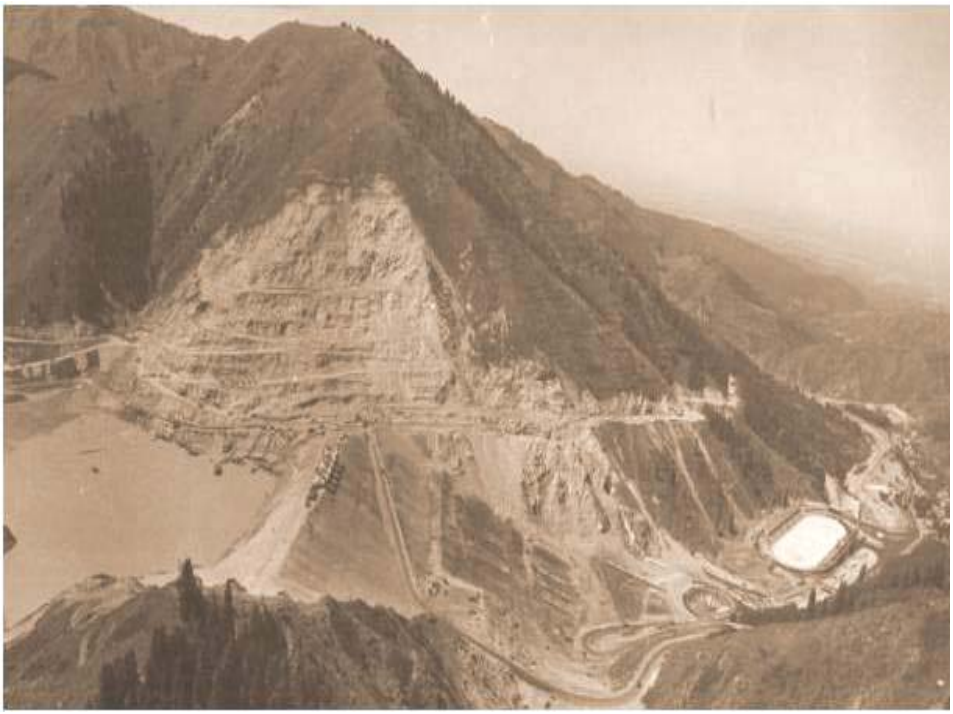


Рисунок 11.16. Селезадерживающая плотина в урочище Медеу в 1973 г.

8,5 млн м^3 породы, в том числе направленными взрывами – 2,5 млн м^3. Система водосбросных туннельных и водоприемных сооружений обеспечивает зарегулированный безопасный сброс воды с расходом до 30 м^3/с с любого горизонта селехранилища. Стоимость сооружения – 33,9 млн рублей [1, 90, 218].

Западную часть г. Алматы защищает ячеистая железобетонная плотина с земляным заполнителем, призванная задерживать сели, формирующиеся в бассейне р. Улькен Алматы (рисунки 11.18, 11.19). Высота плотины составляет 40 м, длина по гребню – 422 м, ширина по основанию – более 200 м, объем селехранилища (при уклоне селевых отложений 4 % [218, 252]) – 14,5 млн м^3. Плотина имеет комплекс водосбросных сооружений, обеспечивающий сброс воды с расходом до 45 м^3/с с любого горизонта селехранилища. Стоимость сооружения – 18 млн рублей [1, 90, 217, 218].

Для предотвращения возможного прорыва озера Улькен Алматы, расположенного на высоте 2500 м и способного вызвать катастрофический селевой поток, была наращена озерная перемычка (рисунок 11.20). Максимальный объем озера составляет 14,3 млн м^3, максимальная глубина – 40,3 м и средняя глубина – 17,8 м. Высота наращивания перемычки – 10 м, длина по гребню – 350 м, ширина по гребню – 18 м, ширина по основанию – 162 м, резервная емкость – 12 млн м^3. Создание дополнительной емкости служит для перехвата селевых потоков, формирующихся выше озера в бассейне р. Озерная, и нейтрализации их волнового воздействия [218].

Рисунок 11.17. Селезадерживающая плотина в урочище Медеу после 1973 г.
(вид с нижнего бьефа)

Рисунок 11.18. Селезадерживающая плотина в бассейне р. Улькен Алматы
(вид с нижнего бьефа)

Рисунок 11.19. Селезадерживающая плотина в бассейне р. Улькен Алматы
(вид с верхнего бьефа)

Рисунок 11.20. Наращенная перемычка озера Улькен Алматы

Для продления срока службы ячеистой железобетонной плотины на р. Улькен Алматы, защиты нижерасположенного автодорожного моста и предотвращения русловой эрозии на р. Кокчека (левый приток р. Улькен Алматы), где прохождение селей отмечается по нескольку раз в год, построена арочная плотина конструкции Ж. Б. Байнатова высотой 6 м, длиной 21,8 м, шириной по гребню 2 м, шириной по основанию 1,8 м. Плотина состоит из сборных клинообразных железобетонных блоков метровой высоты, уложенных по расчетной дуге, со сквозными отверстиями диаметром 50 см и массивными опорами на концах [218, 253]. В настоящее время емкость, образуемая плотиной, полностью занесена (рисунок 11.21).

Западную пригородную зону г. Алматы защищает от селей ячеистая железобетонная плотина на р. Карагалинка (рисунок 11.22). Высота плотины составляет 15 м, длина плотины по гребню – 130 м, объем селехранилища – 1,2 млн $м^3$.

Ячеистая железобетонная плотина с грунтовым заполнителем, построенная в верхней части конуса выноса р. Талгар, защищает г. Талгар от селей, формирующихся в бассейнах рек Правый, Средний и Левый Талгар (рисунки 11.23, 11.24). Высота плотины составляет 45 м, длина – 381 м, ширина по гребню – 10 м, ширина по основанию – 218 м, объем селехранилища – 8,5 млн $м^3$ [1].

Рисунок 11.21. Селезадерживающая плотина на р. Кокчека
(бассейн р. Улькен Алматы)

Рисунок 11.22. Селезадерживающая плотина в бассейне р. Карагалинка
(вид с нижнего бьефа)

Рисунок 11.23. Селезадерживающая плотина в бассейне р. Талгар
(вид с верхнего бьефа)

Рисунок 11.24. Селезадерживающая плотина в бассейне р. Талгар
(вид с нижнего бьефа)

Насыпная плотина и бетонный водосбросной туннель, построенные на месте прорана, образовавшегося при прорыве озера Есик в результате вхождения в него селя в 1963 г., образовала селехранилище, призванное защитить г. Есик от селей, формирующихся в бассейне р. Есик (рисунок 11.25). Высота плотины составляет 48 м, длина по гребню – 160 м, ширина по гребню – 15 м, ширина по основанию – 172 м, объем селехранилища – 12,8 млн м^3, длина водосбросного туннеля – 530 пог. м, сбросной расход – 25 м^3/с.

Насыпная плотина, построенная в бассейне р. Узынкаргалы, предназначена для защиты пос. Фабричный (рисунок 11.26). Высота плотины составляет 34 м, длина по гребню – 170 м, ширина по гребню – 6 м, ширина по основанию – 172 м, объем селехранилища – 0,75 млн м^3 [218].

Рисунок 11.25. Селезадерживающая плотина в бассейне р. Есик (вид с нижнего бьефа)

Селенаправляющие сооружения. Для защиты здания и поселка ГЭС-1 на р. Улькен Алматы (ниже устья р. Кумбель) построена селенаправляющая дамба (рисунок 11.27). Бетонная дамба длиной 800 м и высотой 8–14 м отклоняет выходящие на нее селевые потоки почти на 70°, уклон русла вдоль стенки составляет около 6° [159]. При прохождении катастрофического селя в 1977 г. селенаправляющая дамба успешно выполняла свои функции, отклоняя движение десятков грязекаменных валов.

При частой повторяемости селей необходимо решать проблему истирания селенаправляющей дамбы, обусловленную воздействием крупных фракций твердого компонента селевой массы.

Селепропускные сооружения. К селепропускным сооружениям относят каналы, селеспуски и мосты. С их помощью решаются проблемы пропуска селей через населенные пункты, пересечения селевых русел линейными сооружениями: железными и автомобильными дорогами, газо- и нефтепроводами, ирригационными магистральными каналами и т.д. [6].

При назначении и размещении селепропускных сооружений, определении их конструктивных очертаний необходимо учитывать основные закономерности формирования, движения и отложения селей. В настоящее время в Казахстане проектирование и строительство автомобильных дорог, мостовых переходов, линий электропередач, водопроводов и других объектов часто осуществляется без учета особенностей движения селей и их

Рисунок 11.26. Селезадерживающая плотина в бассейне р. Узынкаргалы

Рисунок 11.27. Селенаправляющая дамба на р. Улькен Алматы

возможного воздействия. Типичным примером негативных последствий подобного являются экономические потери, вызванные прохождением селя на р. Бедельбай (бассейн р. Киши Алматы).

Ущерб от незначительного по масштабам селя 1999 г. в бассейне р. Киши Алматы составил 360 млн тенге [1], что главным образом обусловлено неудачным выбором трассы автодороги Алматы–Медеу, где на участке длиной 500 м имеется 4 моста (рисунок 11.28). Два (из четырех) моста после их восстановления были снабжены решетчатыми сооружениями (рисунок 11.29), которые вызывали изумление у зарубежных специалистов: в соответствии с общепринятыми нормами всюду принимаются меры по увеличению скорости движения селевых потоков перед мостовыми отверстиями, у нас их собирались замедлять. В такой ситуации сели, даже с малым расходом, разрушают мосты и дороги.

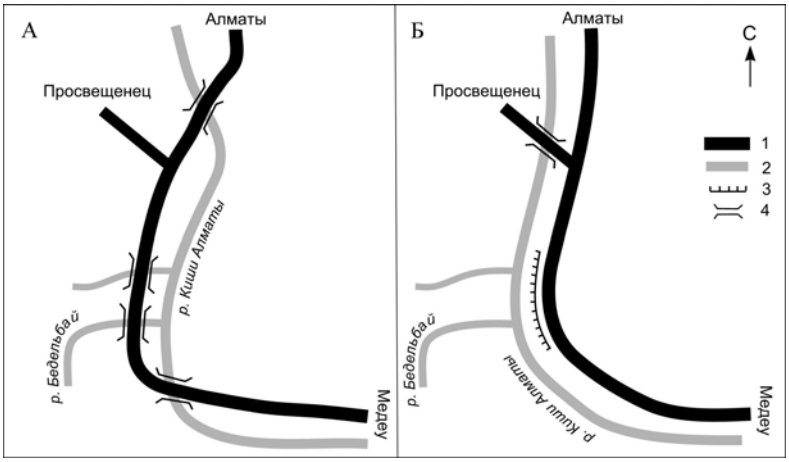


Рисунок 11.28. Взаиморасположение р. Киши Алматы и дороги Алматы–Медеу.
А – существующее; *Б* – оптимальное;
1 – дорога; *2* – река; *3* – селенаправляющая дамба; *4* – мостовые переходы

Рисунок 11.29. Решетчатое сооружение перед мостом

На рисунке 11.28 приведена схема, на которой показано взаиморасположение рек Киши Алматы, Бедельбай и Батарейка, автодороги Алматы–Медеу и мостовых переходов. Во время прохождения селя в 1999 г. основной ущерб был нанесен в результате разрушения мостовых переходов и дороги на 500-метровом участке в районе дома отдыха «Просвещенец». Представляется очевидным, что прохождение очередного селя по р. Бедельбай приведет к ущербу не меньшему, чем в 1999 г.

При учете особенностей движения селей, которые в обязательном порядке должны быть изложены в нормативных документах (СНиП), взаиморасположение автодороги и рек должно быть близко к предлагаемому варианту, показанному на рисунке 11.28, *Б*. Нетрудно видеть, что трасса Алматы–Медеу не пересекает р. Киши Алматы. Вместо четырех мостовых переходов остается один – на малозначимой дороге к дому отдыха «Просвещенец». Участок дороги Алматы–Медеу в дальнейшем был бы защищен не только от селей на р. Бедельбай, но и от селей бассейна р. Кимасар.

В настоящее время обсуждается вопрос о защите автодороги селезадерживающей плотиной. Учитывая рельеф долины р. Бедельбай, отсутствие подъездных путей к месту возможного сооружения плотины и ее стоимость, можно утверждать, что более дешевым и эффективным способом обеспечения безопасности движения будет не строительство плотины, а реконструкция упомянутого участка дороги по схеме, показанной на рисунке 11.28, *Б*.

В настоящее время берегоукрепление на р. Киши Алматы осуществляют с помощью габионов (рисунок 11.30). При прохождении селя, подобного селю 1999 г., габионы будут разрушены, а их содержимое увеличит расход и объем селя.

Рисунок 11.30. Габионы на р. Киши Алматы

11.1. Краткий анализ эффективности противоселевых мероприятий на северном склоне Иле Алатау

К основным противоселевым мероприятиям, проводимым в Казахстане и направленным на уменьшение селевой активности и защиту населенных пунктов от катастрофического воздействия селей, относятся:

предупреждение развития и катастрофического опорожнения поверхностных водоемов моренно-ледниковых комплексов;

защита от селей объектов, расположенных в горных долинах;

защита от катастрофических селей крупных населенных пунктов, расположенных на предгорной равнине.

Высокая эффективность превентивных опорожнений селеопасных озер моренно-ледниковых комплексов была продемонстрирована в 1977 г. при опорожнении озера Жарсай (бассейн р. Есик) и в 1985 г. при опорожнении озера Богатырь (бассейн р. Шелек). Менее удачной была попытка опорожнения озера №6 на леднике Маншук Маметовой, когда в результате его частичного опорожнения озеро осталось селеопасным. Работы по приведению озера №6 в безопасное состояние проводятся по настоящее время. Полученный опыт был успешно использован при опорожнении озер №19 и 20 у ледников Калесника и Северцева в бассейне р. Левый Талгар, а также моренных озер у ледника Молодежный (бассейн р. Киши Алматы) и озера №11 в верховьях руч. Кызылсай в бассейне р. Улькен Алматы [1].

Неудачей закончились работы по опорожнению озера №13 на леднике Советов (бассейн р. Кумбель, приток р. Улькен Алматы). Прорыв озера, объем которого был близок к 74 тыс. $м^3$, в 1977 г. привел к формированию катастрофического селя и нескольких вторичных селей 3–31 августа, нанесших большой материальный ущерб. Суммарный объем этих селей составил (по различным оценкам) 2,4–6 млн $м^3$ [1, 57, 242].

В настоящее время ведутся работы по опорожнению озера №13-бис на леднике Советов, зародившегося в начале XXI века, но уже к 2010 г. имевшего объем, близкий к 150 тыс. $м^3$. Темпы опорожнения озера должны опережать увеличение объема озера. Быстрому росту объема озера способствуют расположение озера в средней пологой части языка ледника и крайне незначительная поверхностная морена.

Защита от селей объектов, находящихся в горных долинах, осуществляется с помощью противоселевых сооружений, относимых к 3–4 классу капитальности. Предотвращение формирования либо развития селей осуществляется стабилизирующими сооружениями. Наиболее крупным из них является плотина в урочище Мынжылки, назначение которой – перехват паводков, образуемых интенсивными и продолжительными жидкими осадками или прорывом водоемов моренно-ледниковых комплексов выше Малоалматинского селевого очага и постепенная их сработка малыми, неселеобразующими расходами. В 1973 г. эта плотина была разрушена водным паводком с расходом около 300 $м^3/с$, образовавшимся в результате катастрофического опорожнения озера №2 на леднике Туйыксу. Разрушение озерной перемычки произошло вследствие ее резкого оседания, обуслов-

ленного фильтрацией и инфильтрацией [159]. Модернизированный вариант плотины в урочище Мынжылки воздействия крупных паводков не испытывал.

При решении вопроса о максимально допустимом объеме воды, который может оставаться в озере №6 на леднике Маншук Маметовой, следует помнить, что прорыв 10 тыс. $м^3$ воды из этого озера приведет к формированию селя с объемом 200 тыс. $м^3$, который полностью заполнит емкость, образуемую плотиной в урочище Мынжылки. В свою очередь, паводок (объемом 200 тыс. $м^3$), который уже не сможет задержать эта плотина, трансформируется в 4 млн $м^3$ селевой массы. Сформировавшийся сель будет задержан плотиной в урочище Медеу. На расчистку селехранилища в урочище Медеу потребуется затратить около 20–40 млн USD. Таковой может быть цена незавершенности опорожнения озера №6.

Каскад стабилизирующих запруд в логу Дикий был сооружен для защиты поселка строителей ГЭС-2 от воздействия селей с расходом до 10 $м^3/с$, которые стали формироваться после антропогенного нарушения растительного покрова в верховьях лога. Стабилизация, достигнутая сооружением 14 земляных запруд высотой 1,3–1,5 м, низовой откос которых был облицован монолитным железобетоном, привела к затуханию селевой деятельности.

Сквозное селезадерживающее сооружение у турбазы «Горельник», состоявшее из треугольных ферм высотой 10 м, расположенных через 3,5 м перпендикулярно створу, соединенных по низовой грани основания балками, и фермы которого крепились тросами для обеспечения общей устойчивости сооружения к анкерам, было разрушено в первые секунды взаимодействия с селем. Основная причина – сооружение не было рассчитано на катастрофические характеристики селя.

Сквозное селезадерживающее сооружение на р. Акжар конструкции И. И. Херхеулидзе построено для испытаний (в натурных условиях) с целью определения селезадерживающей способности, а также уклонов отложений селей. В результате испытаний установлено, в частности, что «… вертикальная стенка в верхнем бьефе при прохождении селя мгновенно кольматируется селевой массой …» [216].

Массивная железобетонная селенаправляющая дамба, сопрягающая устьевую часть р. Кумбель с руслом р. Улькен Алматы, построена для защиты ГЭС-1 и зданий поселка. В результате взаимодействия с селевой массой арматурная сетка дамбы на значительной площади оголилась и будет разрушена последующими селями. В сложных условиях селенаправляющая дамба успешно выполнила свое назначение.

Поскольку в ближайшие десятилетия селевая активность в бассейнах рек Иле Алатау резко возрастет, обсуждаемая селенаправляющая дамба должна стать полигоном для испытания материалов, взаимодействующих с селевой массой, на истирание с целью выбора наиболее прочных.

Сквозное селезадерживающее сооружение на р. Каскелен. Поскольку в настоящее время установлено, что при задержании грязекаменных селей сквозное сооружение ничем не отличается (до момента перелива селевой

массы через гребень плотин) от глухой плотины, можно утверждать, что после задержания сквозным сооружением 2,2 млн м^3 селевой массы начнется ее поверхностный перелив через гребень плотины. В работе А. С. Деговца и Э. Р. Козьминых [216] указывается на «… существенный недостаток сквозных сооружений – наличие ступеней в нижнем бьефе, которые при переливе селевого потока от удара падающих крупных камней быстро разрушаются …», это подтверждается разрушением плотины, призванной защищать г. Тырныауз.

Основные факторы селеформирования в бассейне р. Каскелен близки к идентичным факторам бассейна р. Киши Алматы, следовательно, объемы селей бассейна р. Каскелен могут намного превышать 2,2 млн м^3. Прохождение таких селей приведет к переполнению селехранилища, а разрушение плотины значительно увеличит расход селя. В рекламно-информационной брошюре «Противоселевая защита в Казахстане» [218] сообщается, что «с целью уменьшения скорости потока, а следовательно, и его разрушительной силы, осуществлена стабилизация русла» р. Каскелен. Однако при проектировании «стабилизации» предполагалось, что плотиной будут задержаны все крупные фракции. При переливе селя через гребень плотины, а тем более при ее разрушении в канал поступят все крупные фракции, включая элементы конструкции плотины, взаимодействие с которыми при проектировании канала не предполагалось. Следовательно, канал будет разрушен, а его элементы станут составляющими селевой массы. В такой ситуации последствия для г. Каскелена будут катастрофическими. В связи с этим сооружение новой плотины, гарантирующей безопасность г. Каскелена, весьма актуально.

Наиболее крупной каменно-набросной селезадерживающей плотиной в Казахстане является плотина в урочище Медеу. Первым проектом создания этой плотины предусматривалось сооружение селехранилища емкостью 6,2 млн м^3. Плотина высотой 110 м в основном была возведена к 1973 г., однако из-за недостроенности левобережных водосбросных сооружений при прохождении катастрофического селя 15 июля 1973 г. система водосброса не сработала. Увеличение уровня заполнения селехранилища постселевым паводком грозило переливом воды через гребень плотины и ее разрушением. В ликвидации угрозы формирования селя, который мог разрушить восточную половину г. Алматы, приняли участие многие организации СССР. В последующие годы высота плотины была увеличена до 150 м, емкость селехранилища возросла до 12,6 млн м^3.

Менее крупная каменно-набросная плотина была сооружена на месте прорана, образовавшегося при разрушении перемычки в ходе опорожнения озера Есик, вызванного вхождением селя 1963 г. в озерную котловину. Крупным недостатком этого сооружения являлась недостаточная прочность решеток водоприемников и перекрытий водоводов, устранить которые удалось лишь в начале нынешнего столетия.

Наиболее недостаточной представляется защита населенных пунктов, расположенных на конусе выноса р. Узынкаргалы. Объем селехранилища не соответствует потенциальной селевой активности бассейна этой реки.

Верхняя половина водоприемных устройств многократно уступает по прочности нижней половине, чего не наблюдается на сооружениях в других речных бассейнах Иле Алатау. Поверхностные железобетонные элементы селеслива разрушаются даже без воздействия водных потоков.

Полностью не защищенным от воздействия катастрофических селей остается до настоящего времени конус выноса р. Аксай, почти 100 % заселение которого произошло в последние десятилетия. Наиболее приемлемым паллиативным решением проблемы на ближайшее десятилетие может быть спрямление, расширение и углубление русла реки на участке «кордон–автомобильный мост верхней трассы Алматы–Каргалы (Фабричный)», что на какое-то время создаст условия для аккумуляции селей в карьере нерудных материалов.

Анализ экономической эффективности селезащитных сооружений свидетельствует о том, что наиболее экономичным способом борьбы с селями гляциального генезиса является предупреждение зарождения селеопасных водоемов. Однако отсутствие данных о подземных водоемах моренно-ледниковых комплексов вынуждает возводить наиболее дорогостоящие, но надежные селезадерживающие плотины. На рисунке 11.31 приведены данные о стоимости задержания 1 м^3 условной селевой массы при различных способах борьбы с гляциальными селями.

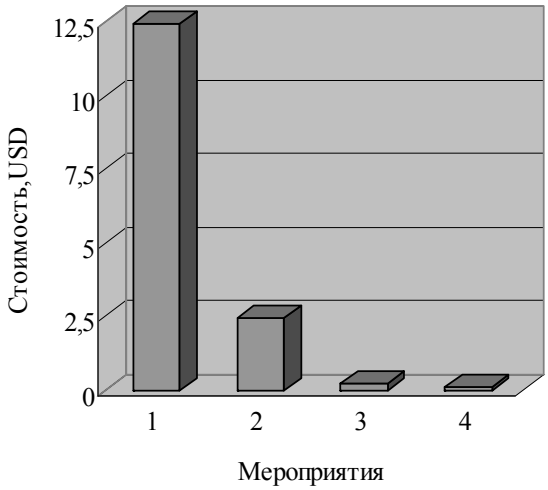


Рисунок 11.31. Стоимость задержания 1 м^3 условной селевой массы:
1 – в селехранилище; *2* – путем аккумуляции воды;
3 – в результате превентивного опорожнения водоемов;
4 – при предотвращении зарождения озер

Из рисунка 11.31 следует, что стоимость «задержания» одного кубометра в селехранилищах намного превышает затраты, необходимые для выполнения мероприятия, эквивалентного по эффективности. Тем не менее именно сооружение крупных селехранилищ легло в основу стратегии защиты от селей в XX веке. Если посмотреть на местоположения плотин,

то нетрудно видеть, что селехранилища расположены преимущественно в конце основных горных долин. Преимущество такого расположения: сели, независимо от генезиса и места зарождения (в пределах речного бассейна), будут задержаны в одном селехранилище, как правило, уклон долины минимальный, а ширина максимальная, наличие и условия проживания рабочей силы, транспортные коммуникации, системы снабжения водой и энергией близки к оптимальным.

Недостатки: селехранилище расположено в непосредственной близости от защищаемого объекта (время добегания селя в случае разрушения плотины близко к нулю); практически вся основная долина, а это могут быть десятки квадратных километров урбанизированных территорий, будет подвержена воздействию селей.

Причиной избрания защиты от селей путем сооружения селехранилищ, образуемых плотинами, послужило, скорее всего, отсутствие опыта, подтверждающего, что надежность превентивных мероприятий близка или даже превышает надежность, обеспечиваемую задержанием селей плотинами. Не последнюю роль при этом играли представления о редкой повторяемости катастрофических селей, исключавшей возможность быстрого накопления упомянутого опыта. Считалось, что наличие селехранилища гарантирует на многие годы безопасное проживание и трудовую деятельность миллионов людей в населенных пунктах, расположенных на конусах выноса, образовавшихся в результате выноса наносов горными реками в течение сотен тысяч лет.

Подводя итоги краткого анализа эффективности противоселевых мероприятий, осуществленных на северном склоне Иле Алатау за последние 50 лет, можно констатировать: несмотря на относительно слабое научное сопровождение противоселевых мероприятий (в первые десятилетия упомянутого выше периода времени), обусловленное «молодостью» науки о селях и командно-административными методами управления, господствовавшими в период существования СССР, защиту от селей в условиях климата XX века можно признать успешной.

Глава 12

СИСТЕМЫ ОПОВЕЩЕНИЯ О СЕЛЕВОЙ ОПАСНОСТИ В КАЗАХСТАНЕ (история, современное состояние и перспективы)

Одной из действенных мер, направленных на уменьшение ущерба движимому имуществу, здоровью и жизни людей, являются информационно-предупредительные мероприятия. Их основное назначение – своевременно оповестить население о существующей и надвигающейся опасности и тем самым смягчить последствия катастроф. Для населения опасность селей вызвана в основном внезапностью их появления. Возникающая при этом паника является одной из основных причин их гибели. Достоинством оповещения о селевой опасности, по сравнению с прогнозом селей, является то, что оповещение информирует об уже возникшем опасном явлении, в то время как прогноз носит вероятностный характер. В связи с тем, что оправдываемость прогноза может быть относительно невысокой, отношение населения к нему носит негативный характер. Высокая достоверность оповещения о селях побуждает население к действиям, рекомендуемым в процессе обучения поведению при возникновении селей, что снижает вероятность паники. Своевременное оповещение о селях уменьшает и ущерб, наносимый гидротехническим сооружениям (водозаборным сооружениям электростанций, оросительных систем и т.д.).

Поскольку селезащитные сооружения не гарантируют полной безопасности от селей, информационно-предупредительным мероприятиям необходимо уделять должное внимание. Они должны включать в себя просветительские лекции-беседы об условиях формирования селей, их характеристиках, существующих селезащитных сооружениях, правилах безопасного передвижения и обустройства лагерей в селеопасных зонах, правилах поведения в условиях внезапного появления селей. Необходимо осуществлять установку информационных щитов в наиболее селеопасных зонах, а также звуковое оповещение со стационарных и передвижных станций в тот период времени, когда опасность катастрофического явления реально существует. В настоящее время информационные щиты об опасности лавин и селей стоят круглогодично, вызывая только раздражение.

Особое внимание должно уделяться прогнозированию селеопасных ситуаций и своевременному доведению получаемой информации до органов, отвечающих за безопасность в чрезвычайных ситуациях, а также населения с помощью средств массовой информации.

Начало организации Службы предупреждений о селевой опасности в бассейне р. Киши Алматы было положено Алма-Атинской гидрологической обсерваторией. Опыт этой обсерватории, результаты специализированных

гидрографических обследований бассейнов рек Киши и Улькен Алматы, а также другие материалы о селевых явлениях Иле Алатау были положены в основу разработки обоснования «Проект организации службы предупреждений г. Алматы об угрозе селей» [254].

В этом «Проекте» рассматривались:

размещение наблюдательных пунктов;

программа работ на этих пунктах;

система связи;

порядок доведения информации и предупреждений до потребителя.

В отсутствии средств автоматизации выявления селей в качестве основных источников информации предлагалось использовать гидрологические станции и посты, метеорологические станции, пункты визуальных наблюдений, дождемерные пункты. Пункты наблюдений предполагалось обеспечить средствами связи согласно схеме, показанной на рисунке 12.1. Порядок доведения информации до потребителя (в сокращенном виде) устанавливался следующий.

Бюро гидрометпрогнозов (БГМП) Управления гидрометслужбы (УГМС) информирует Службу предупреждений (СП), Городскую чрезвычайную комиссию (ГЧК) и организации, расположенные в бассейнах рек Киши и Улькен Алматы, о результатах прогноза погоды. Во время выпадения дождя дежурные СП передают сведения о слое дождя, температуре воздуха и фазовом состоянии осадков по мере необходимости, но не реже чем через 30 мин. В случае угрозы возникновения или при возникновении селя дежурные СП сообщают об этом БГМП, а также дежурным гидроэлектростанций. Дежурный БГМП, в случае угрозы возникновения селя, информирует дежурного ГЧК, а при возникновении селя и председателя ГЧК.

Для своевременного принятия ГЧК необходимых мер авторы «Проекта» считали целесообразным установить три последовательных сигнала, характеризующих степень опасности. Первый сигнал подается, когда (по мнению авторов «Проекта») сель может нанести небольшие повреждения в г. Алматы (расход воды в р. Киши Алматы в створе гидрологического поста «г. Алматы» 15–30 $м^3/с$). Второй – когда возможны значительные повреждения (расход воды 50–60 $м^3/с$). И третий – когда сель, образовавшийся в высокогорной зоне, может создать катастрофическое положение в городе (около 100 $м^3/с$). Этот сигнал являлся основанием для осуществления всего плана спасательных мероприятий. Для передачи и приема этих сигналов устанавливался пароль.

В 1964 г. отделом радиоэлектроники Государственного гидрологического института (г. Ленинград) была разработана радиотелеметрическая автоматически действующая установка для оповещения о селевых потоках (или радиооповеститель селя – РОС), предназначенная для предупреждения населения городов, поселков и других объектов о прохождении селей (паводков). После успешного проведения лабораторных и полевых испытаний 19 таких систем были установлены для эксплуатации в горах Иле Алатау. Техническое обслуживание и эксплуатация РОС на протяжении почти 30 лет осуществлялось Комплексной гидрографической партией РГП

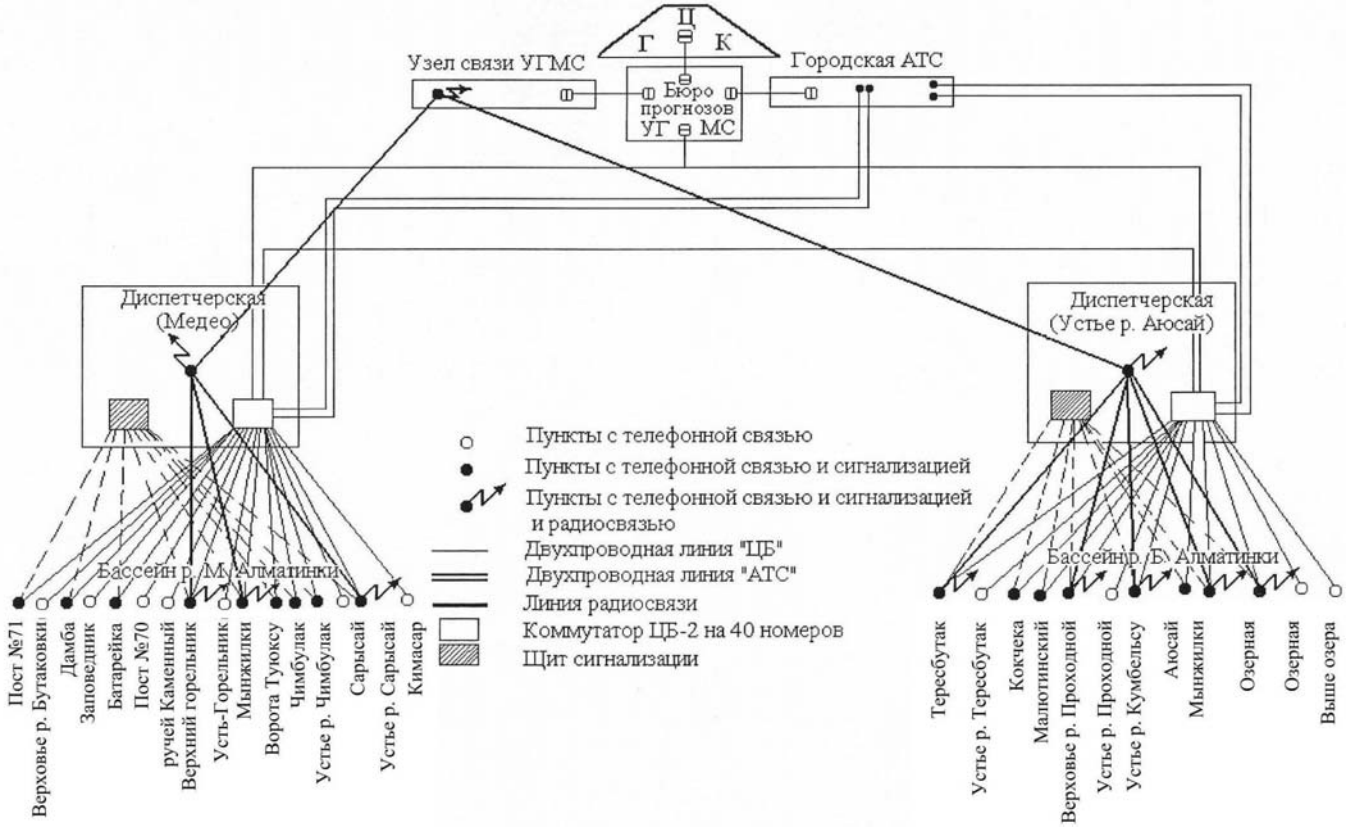


Рисунок 12.1. Схема сигнализации и связи Службы предупреждений о селях г. Алматы

«Казгидромет». В течение этого периода проводилась модернизация систем датчиков уровня воды в реке и датчика селя.

На рисунке 12.2 приведена структурная схема РОС. РОС состоит из двух модулей: передающего и приемного, связь между ними осуществлялась с помощью ультракоротковолновых станций. Состояние комплекса периодически автоматически контролировалось.

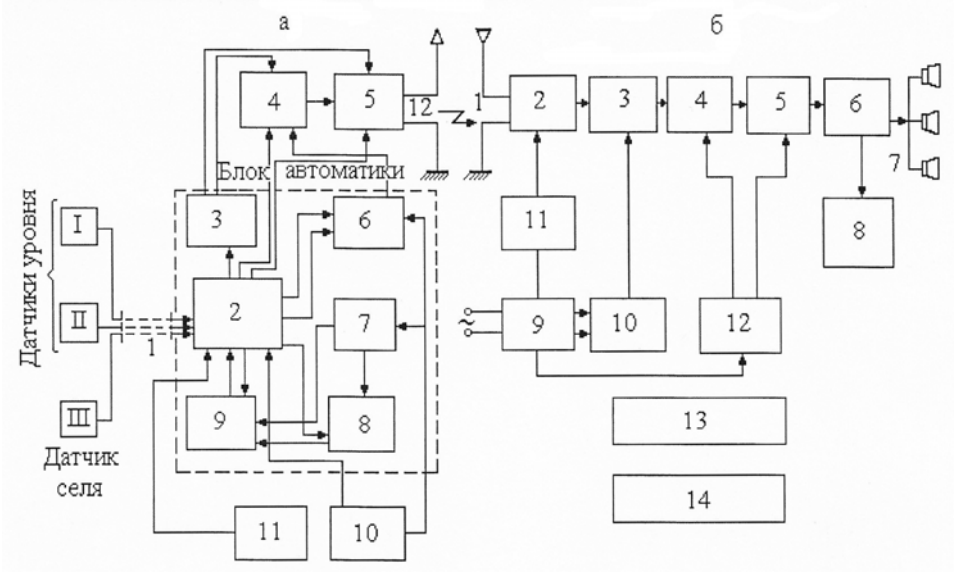


Рисунок 12.2. Структурная схема РОС.
а – передающий пункт: I, II – датчик уровня воды; III – датчик селя;
1 – местная линия связи; *2* – управляющий механизм; *3* – блок задержки времени;
4 – радиопередатчик; *5* – усилитель мощности; *6* – блок генераторов; *7* – блок часов;
8 – программное устройство; *9* – блок усилителей; *10* – блок питания;
11 – резервный блок питания; *12* – антенна.
б – приемный пункт: *1* – антенна; *2* – антенный усилитель; *3* – радиоприемник;
4 – усилители и ограничители; *5* – блок фильтров; *6* – блок звуковых генераторов;
7 – динамики; *8* – световое табло; *9* – стабилизатор напряжения; *10* – полупроводниковый стабилизатор напряжения на 4,8 В; *11* – электронный стабилизатор напряжения;
12 – полупроводниковый стабилизатор напряжения на 12 В;
13 – блок переключения на аварийное питание; *14* – аварийное питание

Результаты длительной эксплуатации РОС свидетельствуют о высокой степени надежности системы. Безотказная работа системы РОС может быть проиллюстрирована данными, полученными при прохождении селя 26 июля 1981 г. (таблица 12.1) [255]. К ее недостаткам можно отнести разрушение системы датчиков уровня воды и конструкции датчика селя (при прохождении селя), что приводило к многодневному выходу из строя всей системы. Существенным недостатком являлась малая заблаговременность предупреждения. Для Иле Алатау она составляла от 15 мин до 1,5 ч.

После распада СССР в результате морального и технического старения, а также трудностей экономического характера система РОС перестала функционировать.

Таблица 12.1. Основные характеристики селевого потока, прошедшего 26 июля 1981 г.

Местоположение створа	Площадь сечения селевого потока, $м^2$	Скорость, м/с	Расход, $м^3/с$
Кумбель-стационар	19,6	3,55	70
Кумбель-РОС	48,5	2,33	191
Кумбель-устье	31,3	3,38	106
РОС-ГЭС-1 (основной)	34,4	2,88	99
РОС-ГЭС-1 (дубль)	33,6	2,73	92
Гидрологический пост «Устье р. Проходной»	15,8	2,08	33

В 1976 г. сотрудниками специального конструкторского бюро (СКБ) завода «Казгеофизприбор» совместно с работниками отдела селей Казахского научно-исследовательского гидрометеорологического института в ходе экспериментов по искусственному воспроизведению селей на Шамалганском полигоне создан комплекс датчиков оповещения о селевой опасности. Результаты экспериментальных исследований показали высокую перспективность использования сейсмических датчиков в системах оповещения о селевой опасности [256, 257]. В 1976–1978 гг. по заданию Казглавселезащиты СКБ завода «Казгеофизприбор» разработал и изготовил два опытно-методических образца сейсмических оповестителей о селевой опасности. Один из них был установлен для полевых испытаний в створе гидрологического поста «Кумбель-устье», где ожидалось прохождение селевых потоков. Приемочные испытания были успешно проведены при искусственном воспроизведении селевого потока 9 сентября 1978 г. на Шамалганском полигоне.

Сейсмический оповеститель селя (СОС), а также устройство демодулирования и согласования (УДС) при наличии линии связи (радио, телефонной) позволяют создавать локальные системы селеоповещения, передачи и регистрации характеристик селей (рисунок 12.3) [258]. Сейсмический оповеститель селя снабжен тремя идентичными сейсмодатчиками ($СД_1$, $СД_2$, $СД_3$), причем $СД_1$ и $СД_2$ располагаются на склоне долины (вне досягаемости селем) на расстоянии 50–75 м друг от друга вдоль селевого русла, а $СД_3$ – на расстоянии 40–50 м от $СД_1$ по перпендикуляру к селевому руслу. Анализ сигналов $СД_1$ и $СД_3$ позволяет выявить сигналы, возбуждаемые селями, на фоне помех, создаваемых природными, антропогенными и другими источниками сейсмических сигналов. По сигналам $СД_1$ и $СД_2$ определяются скорость и расход селя. Включение системы осуществляется автоматически по сигналам $СД_1$ и $СД_3$. По окончании селя система автоматически отключается. Контроль системы осуществлялся дважды в сутки по сигналам кварцевых часов.

К достоинствам системы можно отнести:

отсутствие механического контакта датчиков с селем, благодаря чему система не теряет работоспособность при прохождении селя;

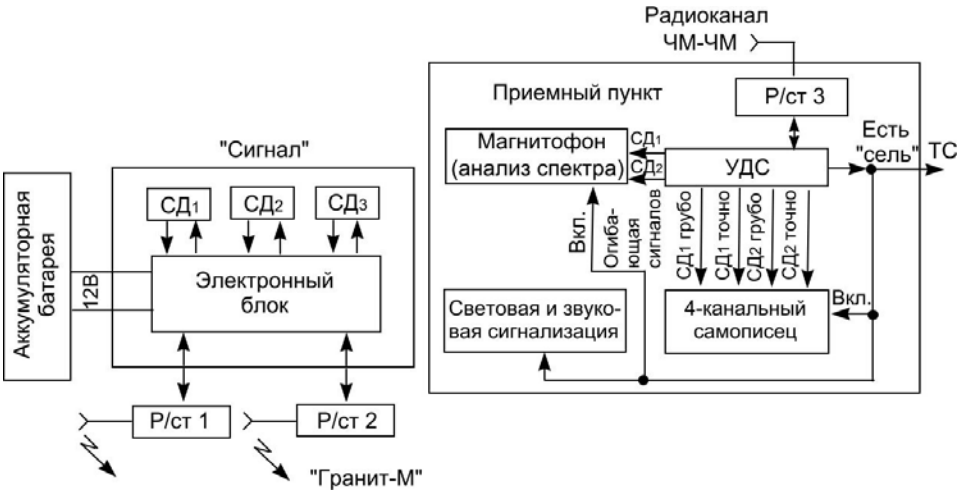


Рисунок 12.3. Блок-схема системы оповещения СОС.
СД – сейсмодатчик; Р/ст – радиостанция; УДС – устройство демодулирования и согласования; ТС – телесигнализация двухпозиционных объектов

непрерывное измерение расхода и скорости потока на всем протяжении селевого процесса;

высокую помехозащищенность;

автоматические включение и переход в режим ожидания.

Описанная сейсмическая система оповещения о селевой опасности была модернизирована в 1989–1990 гг. Научно-исследовательским институтом приборостроения (НИИП) Госкомгидромета СССР при участии КазНИГМИ и прошла успешные приемочные испытания на Шамалганском полигоне в 1991 г. В результате распада СССР она не была внедрена (взамен системы РОС) в практику Казгидромета.

В настоящее время на северном склоне Иле Алатау функционирует служба оповещения о селях, действующая на основании «Временного порядка действий РГП «Казгидромет», ГУ «Казселезащита», акиматов, министерств, ведомств, дежурных служб в случае угрозы или возникновения селевых потоков», приведенная на рисунке 12.4.

В рамках этой системы решение о возникновении селевой опасности (возникновении селя) принимает наблюдатель Поста службы наблюдения ГУ «Казселезащита», который по каналам связи передает установленный сигнал дежурному Главного диспетчерского пункта (ГДП) Казселезащиты. Далее информация о селе передается по упомянутой выше схеме. Главным недостатком этой схемы, по нашему мнению, является длинная цепочка передачи и обработки информации, предшествующая приведению Схемы оповещения в действие. Это подтверждается и расчетами из диссертации начальника департамента по ЧС г. Алматы генерал-майора Д. К. Халикова (рисунок 12.5) [259].

Нетрудно видеть, что время оповещения близко к 45 мин. За это время сель может подойти к границе города, а эвакуация людей, находившихся в опасной зоне (в долине р. Улькен Алматы), не будет проведена.

Рисунок 12.4. Традиционная схема оповещения при возникновении селевого потока

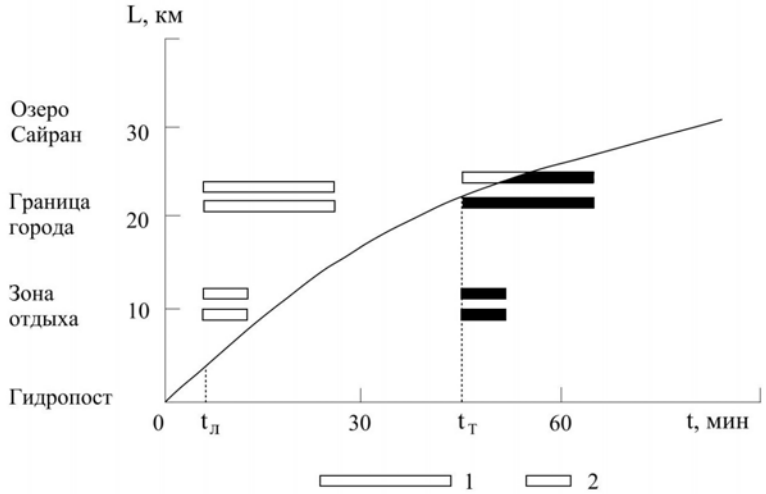


Рисунок 12.5. Зависимость времени добегания селевого потока
по бассейну р. Улькен Алматы.
1 – расчетное время эвакуации отдыхающих; *2* – расчетное время эвакуации горожан;
$t_Т$ – время оповещения при традиционной технологии; $t_Л$ – время оповещения
при логистической технологии с использованием сотовой связи в режиме «сообщений»

В диссертации Д. К. Халикова [259] приведены результаты разработки логистической системы оповещения при угрозе и возникновении селевого потока. Предполагается, что система будет автоматически включаться по сигналам датчиков или данным видеонаблюдений и космического мониторинга (рисунок 12.6).

Обрабатывать сигналы предполагается ЛАСУ (логистической автоматизированной системой управления). Оперативное оповещение будет осуществляться по уровням в зависимости от масштаба селевых потоков. Отдельно предполагается проводить оповещение населения, находящегося в зоне вероятного прохождения селевого потока. Сигнал опасности до населения доводится путем адресного оповещения на основе применения сотовой связи в режиме «сообщений». Увеличение эффективности логистической системы оповещения о селевой опасности достигается ликвидацией промежуточных звеньев, а также переходом на параллельную схему оповещения, «… так как последовательная структура построения традиционной системы оповещения является причиной низкой оперативности функционирования системы оповещения» [259].

Одним из преимуществ логистической системы оповещения о селевой опасности (по сравнению с существующей) должно стать автоматическое включение системы «… по сигналам датчиков или данным видеонаблюдений и космического мониторинга». К сожалению, что это за датчики и каковы их характеристики, в работе не указывается. Не известно также, насколько они работоспособны в ночное время, густом тумане и при ливневых дождях. Все это должно выявляться в процессе конструкторской разработки обсуждаемой системы и испытания ее в реальных условиях.

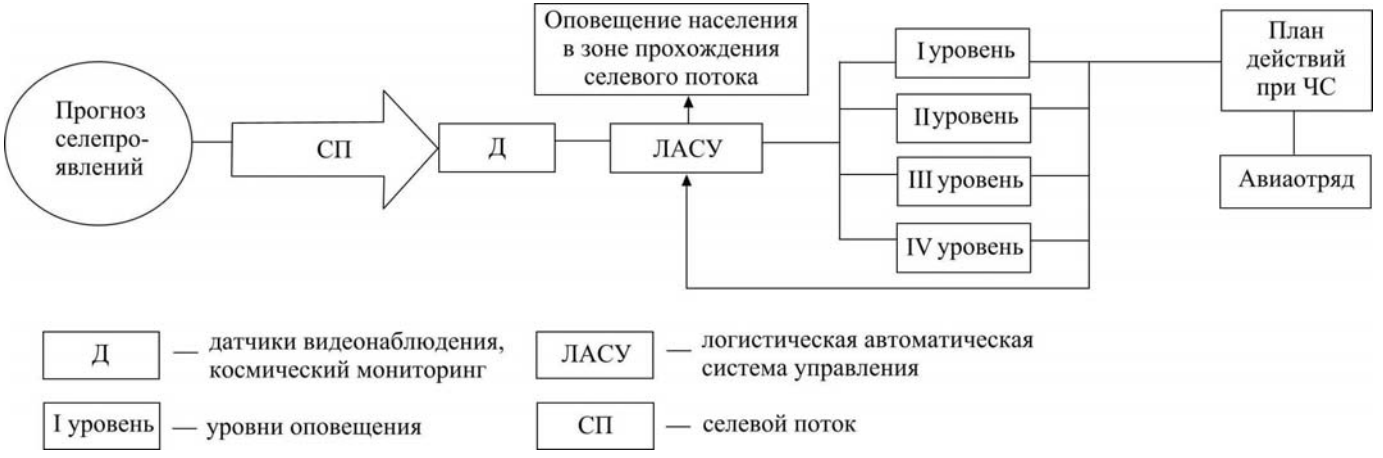


Рисунок 12.6. Логистическая схема оповещения при возникновении селевого потока

Не приведено и обоснование возможности использования космического мониторинга для своевременного (в пределах первого десятка минут) обнаружения селя.

Как отмечалось, оперативное оповещение должно осуществляться по уровням в зависимости от масштаба селевых потоков. Логично предположить, что при катастрофическом селе решение об оповещении населения будет принимать министр МЧС или уполномоченное им лицо. В такой наиболее экстремальной ситуации эффективность логистической системы будет мало отличаться от существующей системы оповещения о селевой опасности.

В связи с этим возникает вопрос: почему решение об оповещении населения об угрозе селя не принимается собственно ЛАСУ? В обсуждаемой схеме ЛАСУ отвечает за обработку поступающих сигналов. Какая-либо другая обработка информации, получаемой с датчиков, схемой не предусматривается. Следовательно, лицо, принимающее решение об оповещении об угрозе селя, может доверять ЛАСУ либо не доверять. В отсутствие дополнительной информации и времени на ее получение, лицо, принимающее решение, вынуждено доверять ЛАСУ. Следовательно, решение об оповещении должно приниматься ЛАСУ, поскольку, по нашему мнению, в обратной связи между уровнями оповещения и ЛАСУ нет необходимости. Такая схема увеличит оперативность и надежность системы.

Главным достоинством описанных систем оповещения является высокая степень достоверности установления факта формирования селя, недостатком – малое время предупрежденности (первые десятки минут), определяемое временем добегания селя до объектов поражения.

Схема оповещения о селевой опасности, предлагаемая РГП «Казгидромет» к реализации в комплексе со сверхкраткосрочным прогнозированием катастрофических селей дождевого генезиса, приведена на рисунке 12.7.

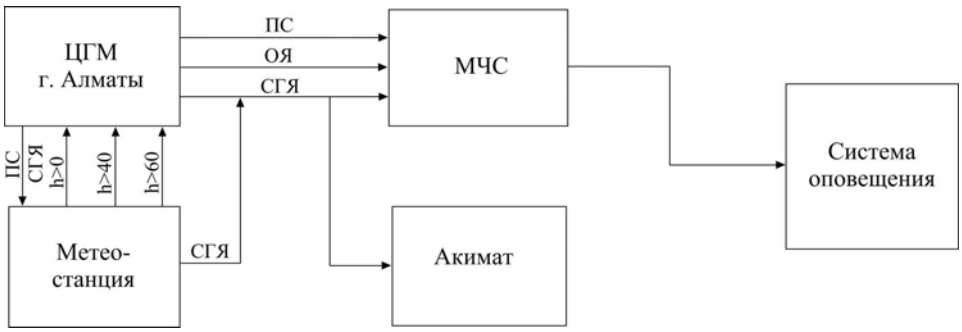


Рисунок 12.7. Схема оповещения о результатах прогноза селя,
фактически выпавших осадках и штормовом предупреждении.
ПС – предупреждение о возможности выпадения сильных осадков;
ОЯ – опасное явление; СГЯ – стихийное гидрометеорологическое явление;
ЦГМ – Центр гидрометеорологического мониторинга

Достоинством этой системы оповещения о селевой опасности является значительное увеличение (до нескольких раз) времени предупрежденности катастрофического явления по сравнению с системами оповещения, в основу которых положено время добегания селей от места их обнаружения до объектов, которым может быть нанесен ущерб. Недостатком – неизбежность ложных прогнозов, обусловленных тем, что ключевым критерием объявления селевой опасности является слой осадков 40 мм, а выпадение осадков таким слоем (один раз в 2–3 года) не вызывает формирование катастрофических селей.

Поскольку заблаговременность сверхкраткосрочного прогноза катастрофических селей дождевого генезиса относительно невелика, целесообразно увеличить его эффективность за счет предварительной подготовленности к возникновению чрезвычайной ситуации подразделений Казгидромета и МЧС, принимающих участие в мониторинге и проведении мероприятий по предотвращению и смягчению ущерба, наносимого селями. Положительный эффект достигается поэтапным оповещением государственных органов и населения о потенциальной угрозе. Предлагаемая система оповещения позволит практически на порядок увеличить оправдываемость прогноза катастрофических селей дождевого генезиса при заблаговременности, обеспечивающей безопасность людей, оказавшихся в потенциально опасной зоне.

Первый этап системы оповещения. При краткосрочном прогнозе жидких осадков: «Сильные осадки в селеопасных районах» отдел краткосрочных прогнозов погоды ЦГМ г. Алматы РГП «Казгидромет» дает «Предупреждение о сильных осадках в селеопасных районах». Однако это предупреждение доводится только до метеорологических станций, участвующих в мониторинге селей, подразделения ЦГМ г. Алматы, занимающегося прогнозированием селей, а также уполномоченного органа МЧС (без права распространения информации населению).

Второй этап. С началом выпадения упомянутых осадков на метеорологических станциях «Мынжылки» и «Шымбулак», о которых наблюдатели метеорологических станций сообщают группе прогноза селей РГП «Казгидромет», дается штормовое предупреждение: «Опасное явление» (ОЯ), которое группой прогноза селей доводится до органов МЧС (без права дальнейшего распространения), отвечающих за безопасность от природных катаклизмов в бассейнах рек Киши и Улькен Алматы.

Третий этап. При выпадении 40 мм осадков на метеорологической станции «Мынжылки» и наличии других факторов, определяющих возможность формирования селя, группой прогноза селей дается штормовое предупреждение: «Стихийное гидрометеорологическое явление» (СГЯ), которое доводится до органов МЧС с целью предупреждения населения и организаций о высокой вероятности возникновения селя.

Предлагаемая схема оповещения о селевой опасности позволит подразделениям РГП «Казгидромет» и МЧС заблаговременно подготовиться к мониторингу селя и мероприятиям, обеспечивающим безопасность населения и функционирования хозяйственного механизма в чрезвычайной си-

туации. С другой стороны, население будет избавлено от многочисленных не оправдавшихся прогнозов селей, что повысит доверие к прогнозам, без которого их прогнозирование не имеет смысла.

Поскольку сели в Иле Алатау имеют не только дождевой генезис, на наиболее селеопасных реках целесообразно установить автоматический сейсмический оповеститель селя, содержащий систему опознавания природы сейсмических сигналов, что практически исключит подачу ложных сигналов о селевой опасности. Такой оповеститель может быть разработан на базе системы СОС. Внедрение сейсмической системы (на новой элементной базе) возможно без существенных материальных затрат на конструкторские проработки. Использование средств космической связи для непрерывной передачи информации о расходе и скорости движения селей позволяет создать на современном этапе развития техники надежную систему оповещения о селях и их характеристиках. Это значительно расширит наши представления о механизмах формирования, движения и остановки селей, увеличит надежность систем оповещения о селевой опасности.

Глава 13

СТРАТЕГИЯ ЗАЩИТЫ ОТ СЕЛЕЙ В XXI ВЕКЕ

13.1. Защита от селей в условиях увеличения селевой активности

В условиях изменяющегося климата, когда селевая активность может возрасти многократно, защита от селей приобретает общегосударственное значение. В зависимости от важности объекта, расположенного в селеопасной зоне, решения по обеспечению безопасности могут носить как политический, так и социально-экономический характер.

Решение о выборе метода управления селевыми рисками и сокращения ущерба от селей принимается на основе всестороннего анализа селевой опасности и селевого риска с учетом природных и социально-экономических последствий их реализации. Ниже рассмотрены инженерно-технические аспекты мероприятий по управлению селевыми рисками и сокращению ущерба, наносимого селями, с учетом опыта, накопленного к настоящему времени в ходе научных исследований и практической деятельности по защите от селей.

Перенос населенных пунктов (или части населенного пункта), подверженных воздействию селей, на безопасную территорию. Прецеденты переноса крупных населенных пунктов, обусловленных опасностью прохождения катастрофических селей, в средствах массовой информации не обнаружены. Как будет показано, перенос г. Алматы на безопасную территорию экономически не целесообразен.

Потенциальная селевая активность бассейнов рек Талгар, Есик и Турген в 4–5 раз превышает потенциальную селевую активность бассейна р. Киши Алматы, а степень хозяйственной освоенности территории конусов выноса рек Талгар, Есик и Турген значительно меньше степени хозяйственной освоенности территории конуса выноса р. Киши Алматы. Если перспективные планы хозяйственного освоения территории этих конусов выноса не предусматривают их значительной урбанизации, защита территорий путем строительства селезащитных комплексов, подобных комплексам на реках Киши и Улькен Алматы, экономически не целесообразна. Следовательно, в условиях активизации селей (при проведении мероприятий по защите от селей населенных пунктов Талгар, Есик и Турген) перенос части населенных пунктов в целях использования освобождающихся территорий для отложения селей или создания селепропускных каналов может оказаться приемлемым.

Запрет на строительство населенных пунктов в зонах, подверженных воздействию селей. Прецеденты запрета строительства крупных населенных пунктов, обусловленные селевой опасностью, в средствах массовой

информации не обнаружены. В условиях многократного усиления селевой активности, вызванного потеплением климата, запрет на строительство населенных пунктов в зонах, подверженных воздействию катастрофических селей, может быть выгоден не только экономически, но и сохранит жизнь и здоровье многих тысяч людей.

Отведение части территории конуса выноса под транзит или отложение селей. В настоящее время степень освоения территорий, представляющих собой конусы выноса, различна. Так, территория конусов выноса рек Киши и Улькен Алматы полностью освоена под жилые и производственные помещения. Жилые и производственные помещения на конусах выноса рек Каскелен и Шамалган занимают около 30 %, на конусах выноса рек Талгар, Есик, Турген и Узынкаргалы – менее 10 %, на конусе выноса р. Каракастек – около 5 %. Остальная часть территории конусов выноса перечисленных рек используется в настоящее время при производстве сельскохозяйственной продукции. Стоимость земли здесь в настоящее время относительно невелика. Поскольку защита от селей этих территорий (в особой мере это относится к конусам выноса рек Узынкаргалы, Талгар и Есик) путем задержания селей в селехранилищах, расположенных в горных долинах, с последующей их расчисткой (как это может быть рекомендовано для г. Алматы) экономически не целесообразна, становится привлекательным отведение части территории конуса выноса под транзит или отложение селей. Это же относится к бассейну р. Турген.

Создание селехранилищ в лёссовых отложениях, частично перекрывающих конусы выноса. В ледниковые эпохи создавались благоприятные условия для накопления лёсса на предгорной равнине, в низкогорной и даже среднегорной зонах северного склона Иле Алатау. Мощность лёссов и лёссовидных отложений на конусах выноса в настоящее время колеблется от 0 до 25 м и более.

В межледниковые эпохи лёссовый покров разрушался горными реками, меняющими свое положение вследствие выхода и отложения селей на конусах выноса. На некоторых конусах выноса лёссовый покров мощностью 20–25 м сохранился на площади более 50 %. Там, где лёссовый покров в межледниковые эпохи не разрушался, а это имеет место в междуречьях, суммарная мощность лёсса может превышать 100 м. Лёссовый массив, возвышающийся на стыке конусов выноса рек Киши и Улькен Алматы, приведен на рисунках 13.1, 13.2.

Для создания селехранилищ наиболее пригодны сохранившиеся фрагменты лёссового покрова, частично перекрывающие конусы выноса рек Узынкаргалы, Шамалган и Каскелен (рисунок 13.3). Даже без помощи человека в лёссовых массивах на малых уклонах водные потоки могут создавать крупные отрицательные формы рельефа (рисунок 13.4).

Сооружение каналов для пропуска селей и постселевых паводков через освоенные или подлежащие освоению территории, подверженные воздействию селей. Отсутствие или недостаточность информации об ущербе, который могут наносить сели, приводили к тому, что в XIX и даже XX веках

Рисунок 13.1. Космический снимок конусов выноса рек Киши и Улькен Алматы:
1 – конус выноса р. Киши Алматы; *2* – конус выноса р. Улькен Алматы;
3 – сохранившийся лёссовый массив, формировавшийся около 1 млн лет

Рисунок 13.2. Лёссовый массив, возвышающийся на стыке
конусов выноса рек Киши и Улькен Алматы (см. рисунок 13.1)

Рисунок 13.3. Фрагмент лёссового покрова,
частично перекрывающего конус выноса р. Узынкаргалы

Рисунок 13.4. Долина, образованная на предгорной равнине
в отложениях лёссовидных пород в районе пос. Бурундай

под городское строительство отводились территории, через которые проходили или отлагались катастрофические сели. Пример тому – г. Алматы и другие населенные пункты, расположенные у подножия Иле Алатау, а также г. Тырныауз.

Город Тырныауз (Россия, Кабардино-Балкария) был основан в 1937 г. на конусе выноса р. Герхожансу (при ее впадении в р. Баксан) для освоения крупного молибдено-вольфрамового месторождения (рисунок 13.5). В том же году через территорию городского строительства прошел дождевой

Рисунок 13.5. Город Тырныауз, расположенный на конусе выноса р. Герхожансу (при ее впадении в р. Баксан)

грязекаменный сель, разрушивший автодорожный мост и шоссейную дорогу, имевших большое значение для строительства нового города. Крупные дождевые сели, причинившие большой ущерб, формировались в бассейне р. Герхожансу в 1960, 1961 и 1962 гг. В 1963 г. был построен селепропускной канал. Канал прямоугольного сечения с железобетонными секционными бортами и грунтовым дном, имевший длину 1764 м и уклон 0,10, оказался недостаточным для пропуска селя 1977 г. В результате 22 одноэтажных дома были затоплены грязью. Головная часть канала и его стены на протяжении 300 м были разрушены в результате эрозионного углубления дна канала и, как следствие, обрушения железобетонных секций.

На реконструкцию канала, законченную в 1983 г., были затрачены средства, превышающие его первоначальную стоимость: завершен концевой участок канала, восстановлены стены, а дно канала укреплено поперечными бетонными шпорами. В целом селепропускной канал оправдал свое назначение, защитив крупный городской район. Однако при реконструкции канала не были учтены ошибки, которые привели к ущербу в 1977 г.:

1. Недостаточный запас прочности оголовка канала и заглубления фундамента опорного зуба стены.

2. Крутой угол поворота, приведший к возникновению слишком большой центробежной силы, воздействовавшей на сооружение.

3. Слишком малые уклоны дна в нижней части лотка, не обеспечивающие транспорт рыхлообломочных пород [251].

Для пропуска селей и постселевых паводков через территорию г. Алматы были возведены различные сооружения. Селенаправляющая дамба в устьевой зоне р. Бутак предназначена для отвода селевых потоков бассейна р. Киши Алматы в русло р. Есентай. Селенаправляющая дамба и селеуловитель котлованного типа являются результатами реализации проекта защиты г. Алматы от селей, разработанного в 1938–1951 гг. экспедицией Академии коммунального хозяйства под руководством Н. С. Дюрнбаума. В соответствии с проектом на конусе выноса р. Киши Алматы предполагалось создание котлованов, способных задержать твердый компонент селевых потоков. Сброс осветленной воды должен был осуществляться по р. Есентай, берега которой планировалось облицевать железобетонными плитами. В качестве котлованов предполагалось использовать карьеры нерудных материалов, что значительно увеличивало экономическую эффективность мероприятия.

В городах Алматы, Есик и Каскелен в целях пропуска селевых паводков через их территории проведена стабилизация русел рек. Отсутствие опыта проектирования и эксплуатации подобных сооружений привело к разрушению облицовки канала в г. Алматы. Вероятность такого исхода прогнозировалась еще в 70-е годы прошлого столетия: «… после «входа» селевого потока в такого рода котлован сброс осветленной, но все же достаточно насыщенной наносами воды представляет собой не простую операцию. … По Весновке будет сбрасываться расчетный расход 20–30 $м^3/с$. Донные отложения здесь представлены гравием и галькой, за короткое время будут смыты потоком; затем начнется процесс размыва незащищенного бетоном дна русла Весновки. Естественно, в таком случае облицованные берега будут подмыты и разрушены ...» [143]. Предвидение Е. Д. Дуйсенова полностью оправдалось (рисунок 13.6).

Иногда селезащитные сооружения разрушаются от рядовых паводков. Примером может служить быстроток на р. Есентай выше проспекта аль-Фараби. Быстроток, сочленяющий русло р. Есентай с котлованным селеуловителем, полностью разрушен (рисунок 13.7) и не может препятствовать врезанию русла реки в селевые отложения. Инженерное сооружение разрушилось в результате того, что при проектировании не была учтена суффозия, вызываемая негерметичностью основного канала. При непринятии мер дальнейшее углубление русла создаст аварийную ситуацию для жилых комплексов, расположенных в охранной зоне реки. Негативные последствия суффозии приводят к разрушению каналов даже на относительно небольших уклонах (рисунок 13.8).

Взаимодействие селя с селезащитными сооружениями – сложный процесс. В общем случае воздействие селя складывается из трех составляющих: гидростатического давления, гидродинамического давления и удара отдельных частиц (размеры которых могут превышать 10 м, а вес – 1000 т).

Рисунок 13.6. Разрушение облицовки стабилизированного
русла р. Есентай из-за эрозионного углубления дна

Рисунок 13.7. Быстроток на р. Есентай выше проспекта аль-Фараби

Рисунок 13.8. Результат суффозионного процесса
на канализированном участке р. Есентай

Анализ результатов воздействия селя 1977 г. на р. Улькен Алматы показал, что степень разрушения опор ЛЭП, водозаборов каскада ГЭС, кирпичных домов значительно превышает давления, рассчитанные по формулам обтекания: при уменьшении площади давление резко увеличивается (рисунок 13.9). Объяснить это можно только проявлением пиковых нагрузок, учет которых при проектировании мостов, опор ЛЭП и других небольших сооружений вызывает большие затруднения.

Вопросам взаимодействия селей с инженерными сооружениями посвящены многочисленные исследования. Обстоятельный обзор этих исследований приведен в работах И. И. Херхеулидзе [260], Г. И. Херхеулидзе [261] и А. И. Квасова [159].

Опыт эксплуатации каналов для пропуска селей и постселевых паводков через освоенные или подлежащие освоению территории, подверженные воздействию селей, свидетельствует о том, что информация, накопленная при проведении научно-исследовательских работ и эксплуатации этих сооружений, используется не в полной мере.

Отведение части территории конуса выноса под отложения селей. Стратегия защиты населенных пунктов, расположенных на конусах выноса, может (в условиях активизации селей дождевого генезиса) базироваться на отведении части территории конусов выноса под транзит или отложение селей. Отложение селей на конусах выноса обусловлено растеканием селевых

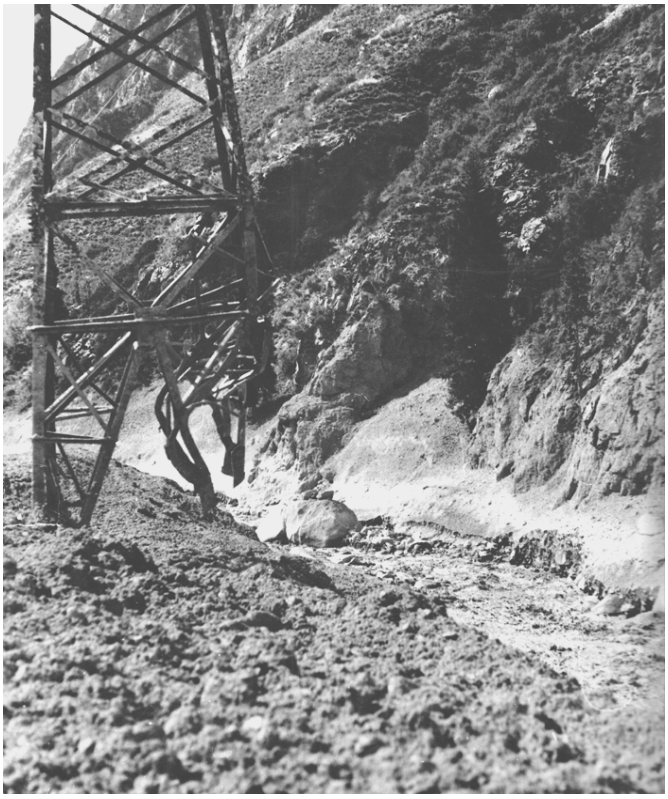


Рисунок 13.9. Разрушение опоры ЛЭП селем в 1977 г.

потоков по поверхности предшествовавших отложений селевой массы. С уменьшением глубины селевого потока причиной остановки селевой массы может служить снижение силы гравитации (приходящейся на единичную площадь поверхности конуса выноса), проявление кулоновского трения (значительно возрастающего при превышении размеров крупных частиц глубины селевого потока), действие силы, обусловленной вязкопластическими свойствами селевой массы.

Отложение селей на части территории конуса выноса обеспечивается созданием селенаправляющей дамбы, ограничивающей возможность растекания селевого потока по поверхности конуса выноса. Ограничение площади растекания (при прочих равных условиях) приводит к увеличению глубины селевого потока и, как следствие, возможности его движения при меньших углах наклона поверхности конусов выноса. Эта особенность отложения селей (по сравнению с аллювием) позволяет использовать для отложения селей территории, выходящие за конусы выноса.

Сведения об опыте проектирования, строительства и эксплуатации сооружений, обеспечивающих отложение селей на части территории конусов выноса, в доступных источниках информации не обнаружены. Однако получение знаний о перспективности аккумуляции селевых отложений на части территории конусов выноса актуально и должно стать предметом

изучения. Результаты этих исследований должны быть использованы при разработке современных СНиП.

Сугубо нелинейная зависимость селевой активности на северном склоне Иле Алатау от средней летней температуры воздуха в высокогорной зоне создает большие проблемы при разработке стратегии защиты от селей. Разработка стратегии защиты от селей может основываться на трех гипотезах о климате XXI века:

климат станет более прохладным;

существенных изменений климата не произойдет;

климат потеплеет.

В первом случае, если существующие селезащитные сооружения соответствуют потенциальным угрозам, стратегия защиты может быть сведена к грамотной эксплуатации селезащитных сооружений.

Во втором случае при неизменном климате и соответствии селезащитных сооружений потенциальным угрозам необходимо разработать и при необходимости внедрить мероприятия, обеспечивающие защиту от селей в ситуации, когда существующие селезащитные сооружения выполнят свои функции и окажутся не дееспособными.

В третьем случае ситуация наиболее сложная, поскольку для разработки стратегии защиты от селей необходим прогноз (сценарий) изменения селевой активности во времени на 50–200 лет и прогноз (сценарий) социально-экономического развития территории, прилегающей к северному склону Иле Алатау на ближайшие 100–200 лет с учетом затрат на предотвращение или уменьшение ущерба, который может быть нанесен селями в результате потепления климата при различных сценариях защиты от селей.

Анализ сценариев изменения климата в Казахстане в первой половине XXI века свидетельствует о том, что к 2050 г. следует ожидать увеличения температуры воздуха на 2,7–2,8 °С, осадки при этом изменятся очень незначительно – на 10–15 %, причем знак изменения величины осадков имеет очень большую степень неопределенности. Следовательно, при оценке изменения селевой активности в результате глобального потепления допустимо принятие гипотезы о неизменности величины осадков. Следует также иметь в виду, что темпы потепления климата в Казахстане более чем в 2 раза превышают темпы глобального потепления [262].

По данным Е. Н. Вилесова, глобальное потепление приведет к практически полной дегляциации хребта Иле Алатау уже к концу XXI века [263]. Учитывая прогнозируемое время полной дегляциации Иле Алатау, а также время, необходимое для зарождения и развития озер моренно-ледниковых комплексов в данном регионе (50–70 лет), можно утверждать, что угроза возникновения селей гляциального генезиса будет сведена к минимуму. Сказанное не означает, что защита от селей гляциального генезиса теряет актуальность. Напротив, глобальное потепление и связанное с ним ускорение процессов формирования и развития водоемов моренно-ледниковых комплексов потребует на протяжении первых десятилетий XXI века активизации превентивных работ по искусственному опорожнению водоемов на моренно-ледниковых комплексах.

В условиях климата XX века один раз в несколько десятилетий создавались гидрометеорологические ситуации, способствовавшие формированию катастрофических селей дождевого генезиса. Прогнозируемое потепление климата приведет к тому, что увеличится продолжительность селеопасного периода, в высотной зоне 3600–4000 м в летнее время осадки будут выпадать преимущественно в виде дождей. Дегляциация бассейнов рек северного склона Иле Алатау вызовет повышение числа рытвин в стартовой зоне. Возрастет и площадь стокообразования, вследствие чего дожди с меньшей интенсивностью станут селеформирующими. Поэтому изучению условий формирования селей дождевого генезиса, разработке превентивных мероприятий, направленных на предотвращение этих селей или уменьшение их характеристик, должно уделяться первостепенное внимание. Селевая активность возрастет не только за счет увеличения повторяемости селевых явлений, но и объема и расхода селей.

Результаты оценки изменения селевой активности на северном склоне Иле Алатау при различных сценариях изменения климата в первой половине XXI века (при линейном характере повышения температуры воздуха) приведены на рисунке 13.10.

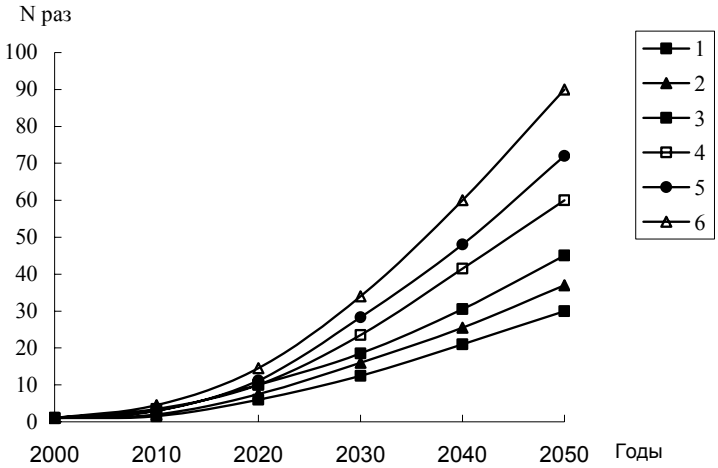


Рисунок 13.10. Изменение повторяемости селеформирующих осадков и селевой активности по сравнению с XX веком для различных сценариев изменения климата до 2050 г.
Изменение повторяемости селеформирующих осадков:
1 – Δt=2 °C; *2* – Δt=3 °C; *3* – Δt=4 °C;
изменение селевой активности: *4* – Δt=2 °C; *5* – Δt=3 °C; *6* – Δt=4 °C

Из рисунка 13.10 следует, что уже в первой половине XXI века существует вероятность увеличения селевой активности в десятки раз по сравнению с XX веком. В связи с этим необходимость разработки новой стратегии защиты от селей, способной предотвратить экологическую катастрофу и сохранить устойчивое развитие Казахстана, не вызывает сомнений.

Установлено, что главным фактором, определяющим селевую активность на северном склоне Иле Алатау, является климатический [264–270]. Мощные сели дождевого и гляциального генезисов, отложение которых

происходит на конусах выноса, расположенных в предгорной зоне, формируются только в условиях климата, близкого (и более теплого) к климату XX века. В ледниковые эпохи небольшие сели отлагаются в горных долинах.

Потепление климата, обусловившее окончание Малого ледникового периода в середине XIX века, привело к увеличению селевой активности в описываемом регионе. Возрастал по мере освоения горных и предгорных районов и селевой риск.

Необходимость в проведении мероприятий по снижению ущерба, наносимого селями в Казахстане, в полной мере была осознана после прохождения селя 1921 г., разрушившего восточную часть г. Верного (Алматы) и приведшего к гибели более 500 человек.

Сель 1921 г. возник в результате выпадения больших по интенсивности и слою жидких осадков в высотной зоне 1500–3500 м. Поскольку в те времена озера на моренно-ледниковых комплексах Иле Алатау только зарождались и их прорыв не был опасным, а сель представлялся мощным водным потоком, транспортирующим большое количество наносов, считалось, что защита от селей может быть обеспечена задержанием наносов инженерными сооружениями и пропуском водного паводка через городскую территорию по заранее созданным каналам.

Гидрологическая оценка вероятности возникновения дождевых паводков с объемом и расходом, близкими к таковым селя 1921 г., осуществленная в 30–40-х годах, показала, что подобные паводки могут формироваться в среднем один раз в 10 000 лет. Столь редкая расчетная повторяемость селей стала причиной потери интереса к защите г. Алматы от селей более чем на 30 лет.

К середине XX века многие озера моренно-ледниковых комплексов, зародившиеся 50–70 лет назад, стали представлять реальную опасность для населенных пунктов, расположенных у подножия Иле Алатау.

Гляциальные сели 1956 г. (бассейн р. Киши Алматы) и 1958 г. (бассейн р. Есик) в силу незначительности ущерба, нанесенного ими, остались практически незамеченными. И только сель 1963 г. на р. Есик, во время которого погибли десятки человек, нанес большой экономический ущерб, он заставил задуматься проектировщиков и директивные органы: что можно ожидать, если подобный сель сформируется в бассейнах рек Киши или Улькен Алматы? Так после Есикской катастрофы проблема защиты столицы республики от селей приобрела первостепенное значение.

Результаты изучения следов прохождения гляциальных селей 1958 и 1963 гг. в бассейне р. Есик, селя 1956 г. в бассейне р. Киши Алматы свидетельствовали о том, что основная часть объема селей (около 80–90 %) представляет собой не воду, как считалось ранее, а обломки горных пород, различающихся по размеру в миллионы раз. Столь незначительное содержание воды в плотной селевой массе говорило о том, что паводки, способные трансформироваться в катастрофические сели, могут формироваться в условиях климата XX века в десятки раз чаще, чем считалось ранее.

Осознание опасности разрушения селем г. Алматы – столицы Казахстана ускорило строительство плотины в урочище Медеу, спасшей город в

1973 г. от селя, возникшего вследствие прорыва озера на леднике Туйыксу. После этого селя проектная емкость селехранилища (путем наращивания высоты плотины) была увеличена с 6,2 до 12,6 млн м^3. В последующие годы проектировались и сооружались плотины в бассейнах рек Улькен Алматы, Каскелен, Есик, Узынкаргалы и Карагалинка. Последняя плотина возведена в бассейне р. Талгар. Эти плотины имели различную конструкцию и создавали существенно отличающиеся по объему селехранилища: 14,5 млн м^3 – на р. Улькен Алматы и 0,75 млн м^3 – на р. Узынкаргалы.

Результаты исследований последних десятилетий позволяют дать относительно объективную оценку степени защищенности упомянутых объектов от селей как при современном климате, так и в условиях глобального потепления. Сложность объективной оценки селевой опасности в бассейнах рек северного склона Иле Алатау обусловлена тем, что климат голоцена в этом регионе изменялся. Поскольку даже относительно незначительное изменение температуры воздуха приводило к резким изменениям селевой активности, а надежные исторические данные наблюдений за формированием селей имеются только по бассейну р. Киши Алматы (да и то только за последние 150–160 лет, другие способы определения возраста отложений селей на конусе выноса до последнего времени осуществить не удавалось), степень защищенности от селей в бассейнах других рек оценивалась относительно таковой бассейна р. Киши Алматы.

Степень защищенности объектов, расположенных на конусе выноса р. Киши Алматы, в условиях современного климата может быть охарактеризована как минимально достаточная. Основанием для такого заключения являются:

малая вероятность заполнения селехранилища в урочище Медеу одним селем дождевого генезиса или прорывом поверхностного водоема;

емкость, созданная плотиной в урочище Мынжылки, вместе с селехранилищем в Медеу способны нейтрализовать негативные последствия катастрофического паводка с объемом около 0,5 млн м^3, вызванного прорывом внутриледниковых водоемов моренно-ледникового комплекса Туйыксу.

Реализуемая в последние десятилетия концепция защиты от селей разрабатывалась в отсутствие научно обоснованных представлений о селевой активности бассейнов рек северного склона Иле Алатау. Наиболее достоверная информация о селевой активности имелась только по бассейну р. Киши Алматы. Оценка реальной селевой опасности стала возможной лишь в результате исследований, выполненных в 1993–1998 гг. [63, 264, 271, 272], и разработки основ управления селевыми процессами горных систем Казахстана [273, 274]. Это позволило дать объективную оценку правильности проектных решений по защите населенных пунктов и объектов хозяйственной деятельности в основных бассейнах рек северного склона Иле Алатау. Результаты расчета необходимой емкости селезадерживающих сооружений и паспортные данные плотин, возведенных к настоящему времени, приведены на рисунке 13.11. Основой расчета послужила проверенная временем селевая активность бассейна р. Киши Алматы, где в течение XX века сформировались 2 селя суммарным объемом около

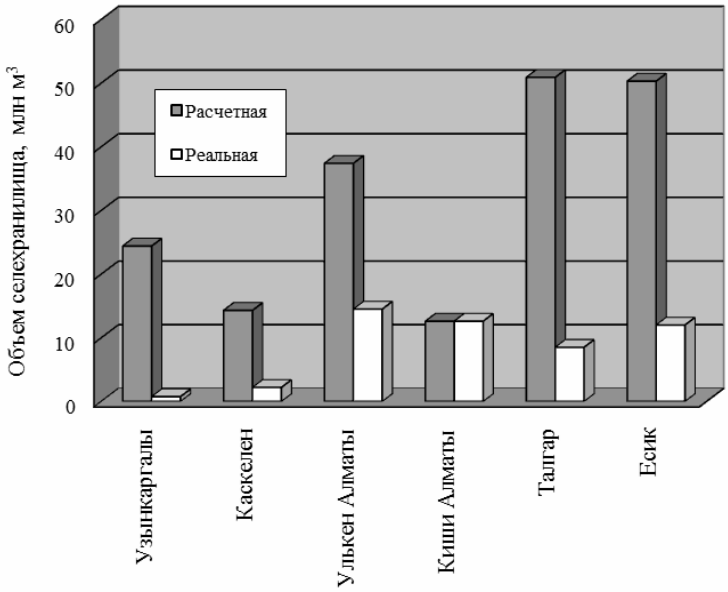


Рисунок 13.11. Расчетные и реальные объемы селехранилищ

8 млн м^3, и данные об объеме селя, который может сформироваться при прорыве озера №6 на леднике Маншук Маметовой (более 10 млн м^3 [22]), а также сведения о селевой активности других бассейнов, оцененные по объемам конусов выноса, замыкающих эти бассейны.

Если принять за «эталон минимальной достаточности» соотношение селевой опасности в бассейне р. Киши Алматы и объем селехранилища в урочище Медеу, то можно оценить степень защищенности от селей населенных пунктов и объектов хозяйственной деятельности, расположенных на конусах выноса основных рек северного склона Иле Алатау, поскольку объемы их конусов выноса характеризуют относительную селевую активность речных бассейнов, а объем селехранилищ, созданных в соответствующих бассейнах, – степень защиты. Тогда минимально необходимый (расчетный) объем селехранилища W_i (млн м^3) для бассейна, конус выноса которого имеет объем V_i (млрд м^3), рассчитывается по формуле

$$W_i = W_{Медеу} \frac{V_i}{V_{К.А.}}, \qquad (13.1)$$

где $W_{Медеу}$ – объем селехранилища в урочище Медеу (12,6 млн м^3); $V_{К.А.}$ – объем конуса выноса р. Киши Алматы (2,5 млрд м^3).

Из данных, приведенных на рисунке 13.11, следует, что селехранилища, образуемые плотинами, возведенными на реках северного склона Иле Алатау (за исключением р. Киши Алматы), не обеспечивают защиты населенных пунктов и объектов хозяйственной деятельности от угрозы селей. Населенные пункты и объекты хозяйственной деятельности, расположенные на конусах выноса рек Аксай и Шамалган, до настоящего времени не защищены от разрушительного воздействия селей.

Скорее всего, нерационально сооружать в бассейнах рек Есик и Талгар селехранилища с объемом около 50 млн м^3, но для обеспечения безопасности в этих бассейнах необходимо проводить превентивные мероприятия адекватные существующей угрозе.

Особую тревогу вызывает то обстоятельство, что после заполнения селехранилищ защищаемые объекты остаются без защиты на неопределенное время, так как планы и проекты на случай упомянутой ситуации отсутствуют, а строительство новых селезащитных сооружений занимает несколько лет. Формирование второго катастрофического селя (до завершения устранения последствий первого) в условиях бассейна р. Киши Алматы неизбежно приведет к разрушению восточной части г. Алматы, поскольку в процесс вторичного селеформирования будет вовлечен грунт плотины в урочище Медеу и селевые отложения, предшествовавшие моменту разрушения плотины. По своим масштабам такой сель будет на порядок превышать сель 1921 г. Социальные и экономические последствия его будут для страны катастрофическими.

Расчеты показывают, что за период вюрмской эпохи оледенения, продолжавшейся около 100 тыс. лет, в высокогорной зоне северного склона Иле Алатау накопилось около 4 км^3 отложений, способных принимать участие в процессах селеформирования. Из этого объема за последние 10 тыс. лет на предгорную равнину селями было вынесено менее 5 %. Объем оставшегося материала примерно в 70 раз превышает суммарную емкость селехранилищ, защищающих населенные пункты и объекты хозяйственного назначения от разрушительного воздействия селей. При потеплении климата на 2–3 °С наносы, накопившиеся в высокогорной зоне, в течение нескольких десятилетий XXI века могут быть вынесены на предгорную равнину. Такое развитие событий привело бы к экологической катастрофе в Казахстане. Альтернативой описанному сценарию является своевременное широкомасштабное проведение превентивных работ по предотвращению зарождения и развития селей дождевого и гляциального генезисов [271].

В Казахстане применяются плотины различного типа, образовавшие селехранилища, способные, по замыслам проектировщиков, вместить несколько катастрофических селей. Чем руководствовались проектировщики-гидротехники при назначении объема селехранилищ в условиях административно-командной системы управления в СССР, достоверно не известно. Во всяком случае ни численность населения, ни физико-географические условия селевых бассейнов решающей роли не играли

В рисс-вюрмском межледниковье, когда температура воздуха на юге Казахстана превышала современное значение на 2–3 ºС, произошел, в течение относительно короткого промежутка времени, выброс наносов, накопившихся в высокогорной и среднегорной зонах в период рисской ледниковой эпохи. В результате этого выброса объемы конусов выноса, образовавшихся на предгорной равнине Иле Алатау за последние 1–1,2 млн лет, увеличились практически в 1,5–2 раза. Это позволило оценить объем выбросов наносов из различных бассейнов рек хребта на предгорную

Таблица 13.1. Ориентировочная стоимость потенциальных селезащитных мероприятий при реализуемой в настоящее время концепции защиты от селей

Бассейн реки	Объем выноса наносов в рисс-вюрмское межледниковье, млн м^3	Минимальный объем наносов, который может быть вынесен за короткий промежуток времени, млн м^3	Стоимость недвижимости, расположенной на конусах выноса, млрд USD	Стоимость селеза-щитных мероприятий, млрд USD
Турген	5700	1000	0,029	5–7
Есик	4500	2000	3,5	10–14
Талгар	5100	1000	0,13	5–7
Киши Алматы	1250	200	50–60	1–1,5
Улькен Алматы	3800	700		3,5–5
Аксай	1000	300	0,015	1,5–4
Каскелен	1500	400	3,8	2–3
Шамалган	350	100	2,4	0,5–0,7
Узынкаргалы	2500	500	0,51	2,5–3,5

равнину в рисс-вюрмском межледниковье и предполагаемых выносов при потеплении климата на 2–3 ºС (таблица 13.1).

В таблице 13.1 приведена ориентировочная стоимость селезащитных мероприятий, обеспечивающих безопасность проживания на конусах выноса в предположении, что сели будут задержаны плотинами, подобными тем, которые эксплуатируются в настоящее время. Стоимость задержания 1 м^3 селевой массы принята равной 5–7 USD.

Стоимость недвижимости в населенных пунктах Турген, Талгар, Аксай, Фабричный, приходящаяся на 1 жителя, принята равной 0,5 от стоимости недвижимости в г. Алматы.

Приведенная в таблице 13.1 стоимость недвижимости, расположенной на конусах выноса, – минимальная оценка, учитывающая только залповые выбросы. С меньшей интенсивностью может быть вынесен объем наносов, в 1,5–2 раза превышающий указанные величины.

Нетрудно сделать вывод о том, что в большинстве случаев стоимость защищаемых объектов значительно ниже затрат, необходимых для строительства селезащитных сооружений. Еще важнее учесть то обстоятельство, что морфометрические характеристики горных долин не позволяют сооружать селехранилища необходимой емкости.

Осложняющим фактором является и наличие в долинах естественных и искусственных плотин. При защите от селей с помощью последовательной системы селехранилищ необходимо начинать их заполнение с наиболее низко расположенной плотины. И лишь после заполнения этого селехранилища целесообразно заполнение вышерасположенного селехранилища. В противном случае переполнение вышерасположенного селехранилища и

перелив селя через гребень плотины неминуемо приведут к заполнению нижерасположенного селехранилища не только вновь сформировавшимся селем, но и селевой массой, накопившейся в вышерасположенном селехранилище, сохраняющей текучесть многие годы, а также материалом плотины, разрушенной в результате перелива селя через ее гребень.

Ситуация значительно усложняется, когда в средней части долины расположены естественные селехранилища, такие, как, например, озера Улькен Алматы и Есик, образованные в результате гигантских обвалов. Емкости этих селехранилищ практически заполнены. Последующие сели, переливаясь через гребни завалов, будут вовлекать в селеформирование десятки и даже сотни миллионов кубометров аномально увлажненных рыхлообломочных пород. Сказанное делает защиту от селей путем сооружения селехранилищ (с последующим сохранением селевой массы), являющуюся в настоящее время главным направлением, бесперспективной.

Альтернативой задержания селей в селехранилищах (с последующим сохранением селевой массы) могут быть:

предотвращение зарождения и развития водоемов моренно-ледниковых комплексов;

превентивное опорожнение селеопасных водоемов;

активное воздействие на интенсивность и слой жидких осадков;

мелиорация стартовых зон селей дождевого генезиса;

задержание селей в селехранилищах с последующей их расчисткой;

пропуск селей через верхнюю (освоенную) часть территории конуса выноса;

аккумуляция отложений селей на части конуса выноса;

эвакуация населенных пунктов, объектов хозяйственной деятельности с территории конусов выноса на предгорную равнину.

При выборе стратегии селезащиты необходимо учитывать, что многократная активизация селей может начаться уже к 2040–2050 гг.

Оценим возможность реализации упомянутых альтернатив:

1. Передислокация крупных населенных пунктов за 15–20 лет представляется нереальной. Не исключена возможность такой операции на конусах выноса рек Аксай и Шамалган, на которых расположены небольшие населенные пункты.

2. Активное воздействие на интенсивность и слой жидких осадков теоретически возможно, однако насколько это реально и какова стоимость регулярного осуществления подобных операций над территорией всего хребта, в настоящее время оценить невозможно.

3. Пропуск селей через верхнюю (освоенную) часть территории конуса выноса требует сооружения плотины и канала, боковые стенки которого должны в конечной фазе увеличения селевой активности возвышаться над современной поверхностью конуса выноса на 20–30 м и иметь длину 10–15 км. Ориентировочная стоимость сооружения 50–100 млн USD. Недостаток – вся горная долина на протяжении десятилетий превратится в транзитную зону (движение селей без отложений селевой массы и вовлечения в селеобразование рыхлообломочных пород). Большую часть лета вода реки

будет непригодна для питья из-за большой мутности. Способ пригоден для реализации в бассейнах рек Есик, Талгар, Каскелен.

4. Аккумуляция селей на части конуса выноса осуществляется с помощью селенаправляющей дамбы, которая направляет сель на малоосвоенную часть конуса выноса. Стоимость дамбы близка к стоимости канала – 50–100 млн USD. Может быть использована в бассейнах рек Есик, Талгар, Каскелен; непригодна для г. Алматы. Недостаток – вся горная долина на протяжении десятилетий превратится в транзитную зону. Большую часть лета вода реки будет непригодна для питья из-за большой мутности.

5. Мелиорация стартовых зон селей дождевого генезиса может осуществляться по мере дегляциации хребта. Стоимость мелиорации речного бассейна с площадью водосбора 75–150 км^2 (например, р. Киши Алматы) в экономической ситуации 2004 г. близка к 10 млн USD. По мере роста оплаты труда стоимость работ будет возрастать, но вряд ли превысит 50 млн USD. Достоинства метода – катастрофические сели, выходящие на конус выноса, формироваться не будут, период капиталовложений 25–30 лет, т.е. 300–400 тыс. USD в год. Вода будет пригодна для питья и технологических целей.

При оценке стоимости защиты населенных пунктов от селей не учитывалась стоимость работ по предотвращению селей гляциального генезиса, так как ее величина настолько мала, что лежит в рамках погрешности определения стоимости работ по предотвращению селей дождевого генезиса.

Опыт борьбы с селями на северном склоне Иле Алатау показал, что при рациональном использовании научного потенциала Республики Казахстан затраты на селезащитные мероприятия могут быть значительно снижены. Минимизация ущерба, наносимого селями, может быть осуществлена только при реализации комплекса селезащитных мероприятий.

В результате исследований последних лет установлено, что причиной зарождения селей дождевого генезиса на северном склоне Иле Алатау является сдвиг водонасыщенных рыхлообломочных пород в отрицательных формах рельефа. Их обводнение происходит при выпадении ливневых жидких осадков, когда подземные каналы стока не обеспечивают безнапорное движение паводковых вод. Возникновение селей можно предотвратить проведением мелиоративных работ в потенциальных очагах селеобразования, трансформируя подземный сток в поверхностный [19].

Наличие угрозы жизненным интересам более чем 13 % населения Республики Казахстан, обусловленной активизацией селей, результаты научных исследований последних лет, а также накопленный опыт противоселевых мероприятий позволяют сделать вывод о необходимости пересмотра стратегии защиты от селей. Основным направлением современной концепции защиты от селей является строительство селезадерживающих сооружений. Второстепенная роль отводится задержанию паводковых вод в высокогорной зоне (плотина в урочище Мынжылки), а также превентивному опорожнению селеопасных озер [22]. Потепление климата на 2–3 ºС при непринятии мер по снижению селевой активности приведет к активизации эрозионных процессов и, как следствие, опустыниванию не только высоко-

горной зоны, но и низкогорья, а также предгорной равнины. Появится значительная угроза биоразнообразию в горной и предгорной зонах, хозяйственной деятельности в наиболее густо населенных районах юга и юго-востока Казахстана.

Предлагаемая концепция стратегии защиты от селей требует коренного пересмотра соотношения затрат на противоселевые мероприятия. Генеральным направлением деятельности организаций, занимающихся обеспечением защиты от селей населения и объектов хозяйственной деятельности, должны, по нашему мнению, стать превентивные мероприятия [272].

Примером политического решения проблемы защиты от селей г. Алматы и других населенных пунктов, расположенных у подножия Иле Алатау, может быть их перенос на север вплоть до Капшагайского водохранилища. Такой вариант обеспечения безопасности рассматривался Казахским филиалом института «Гидропроект» им. С. Я. Жука еще в 1970 г. (таблица 13.2).

Таблица 13.2. Ориентировочная стоимость противоселевых мероприятий в различных бассейнах рек Иле Алатау и переноса населенных пунктов из селеопасной зоны

Река	Объем выноса наносов селей 1 % обеспеченности, млн $м^3$	Стоимость селезащитных сооружений, млн руб.	Стоимость переноса населенных пунктов из селеопасной зоны, млн руб. (1970 г.)	Стоимость переноса населенных пунктов из селеопасной зоны, млн USD (2010 г.)
Турген	3,6	6,0	3,8	–
Есик	1,9	4,1	8,7	7000
Талгар	3,0	7,5	12,8	–
Киши и Улькен Алматы	10,0	120 млн USD	2-3 млрд USD	60000–80000
Карагалинка	0,3	2,0	3,0	–
Аксай	2,0	5,4	2,0	–
Каскелен	2,5	5,9	6,6	7600
Шамалган	1,1	3,5	2,4	4800
Узынкаргалы	1,4	3,0	4,0	510

При этом одновременно решается в определенной мере как проблема возможного разрушения города сильным землетрясением, так и загрязнения воздушного бассейна города выхлопными газами. Однако в настоящей социально-экономической обстановке эти варианты вряд ли реальны. Так, в частности, г. Алматы придан статус финансовой, научной и культурной столицы Республики Казахстан, в результате чего город практически перестраивается, на что затрачиваются колоссальные средства. Следовательно, политическое решение этой проблемы маловероятно.

Если в основу защиты от селей положен экономический фактор, проводятся противоселевые мероприятия: превентивные, организационно-хозяй-

ственные и защитные [273, 274]. В общем случае выбор стратегии защиты от селей должен основываться на результатах технико-экономического анализа следующего комплекса факторов:

потенциального объема наносов, выносимых на территорию защищаемого объекта;

стоимости ущерба, наносимого селями (с учетом роста цен на недвижимость и земельные участки на перспективу 50–100 лет);

периода времени, в течение которого будет нанесен ущерб;

наличия (отсутствия) дефицита времени и средств в ходе проведения противоселевых мероприятий;

комплексного характера противоселевых мероприятий;

первоочередности сооружения элементов комплекса противоселевых мероприятий, которая должна определяться величиной соотношения эффективность/затраты, где под эффективностью понимается ущерб, предотвращенный в результате проведения того или иного мероприятия;

а также экологического фактора.

В условиях, типичных для северного склона Иле Алатау, основным материалом, выносимым на предгорную равнину и образующим конусы выноса, являются морены древних оледенений. Поскольку большая часть объема морен рисского оледенения была вынесена селями на конусы выноса в период рисс-вюрмского межледниковья, основным материалом для формирования селей в XXI веке будут служить морены вюрмского оледенения. Как указывалось, фронтальные части вюрмских морен расположены в высотной зоне 2400–3200 м. Следовательно, с учетом особенностей геоморфологии северного склона Иле Алатау основные площади водосборов селей, формирующихся на моренах вюрмского оледенения, находятся выше 3000 м.

Высотная зона 2800–3200 м в горных долинах хребта характеризуется наиболее малыми уклонами и большой шириной долин, поэтому она наиболее пригодна для задержания паводков, образующихся при прорыве водоемов современных моренно-ледниковых комплексов. Однако сооружение плотин на таких высотах экономически эффективно лишь при задержании водных потоков. Поэтому, если выше этих плотин имеются условия для образования селей, способных заполнять селехранилища, образуемые плотинами и предназначенные для перехвата водных паводков, необходимо своевременно и в полном объеме осуществлять работы по превентивному опорожнению опасных водоемов моренно-ледниковых комплексов и мелиорации стартовых зон селей дождевого генезиса.

Стратегия защиты от селей в современных экономических условиях основывается, как правило, на результатах сравнения потенциального ущерба, который может быть нанесен селями, со стоимостью противоселевых мероприятий. Однако при разработке стратегии необходимо принимать во внимание и другие природные стихийные явления (например, землетрясения), а также экологические, военно-политические и другие факторы. При этом нужно учитывать и возможное значительное изменение во времени стоимости недвижимости и земельных участков. Так, за 2000–2008 гг. стоимость жилья и земли в г. Алматы возросла более чем на порядок.

К настоящему времени установлено, что мероприятия превентивного характера не гарантируют полной защиты, в связи с чем строительство селехранилищ в горных долинах остается необходимым элементом обеспечения безопасности. Однако сооружение одиночных селехранилищ (с последующим хранением селевой массы) приемлемо лишь при высокой эффективности превентивных мероприятий, редкой повторяемости катастрофических селей и высокой стоимости защищаемых объектов.

Если уровень урбанизации территории конуса выноса незначительный, а стоимость превентивных мероприятий значительно превышает стоимость защищаемых объектов и земель, изымаемых с целью обеспечения безопасности, целесообразен пропуск селей через защищаемую территорию или использование части конуса выноса для отложения селей в его пределах.

Катастрофические сели, зарождающиеся в высокогорной зоне, наносят ущерб объектам, расположенным в долинах и на конусах выноса горных рек, поэтому для каждого селевого бассейна должна разрабатываться индивидуальная стратегия защиты.

В ситуациях, когда конусы выноса смежных бассейнов сливаются, разрабатывается стратегия, обеспечивающая защиту всего комплекса объектов возможного поражения. Примером может служить г. Алматы, расположенный на конусах выноса рек Киши и Улькен Алматы, имеющих площадь взаимного перекрытия более 30 %.

Если, например, защита осуществляется путем аккумуляции селей в селехранилищах, образуемых плотинами, то главными факторами, определяющими степень защищенности объектов, которым угрожают сели, являются:

правильность определения расчетного объема селехранилища;

выбор конструкции плотины;

соблюдение технологии возведения плотины;

выполнение правил эксплуатации сооружения.

В ситуациях, когда плотина снабжена селеспуском, риск нанесения ущерба зависит от:

объема селя;

правильности расчета объема селехранилища на момент перелива селя через гребень плотины по каналу селеспуска;

выбора конструкции селеспуска;

соблюдения технологии его сооружения;

выполнения правил эксплуатации селеспуска и всего сооружения в целом;

местоположения объекта, которому угрожает сель.

13.2. Концепция защиты г. Алматы

Защите г. Алматы – южной столицы Казахстана Правительством Казахской ССР, а в настоящее время Президентом и Правительством Республики Казахстан уделялось и уделяется большое внимание. Город Алматы расположен на конусах выноса рек Киши и Улькен Алматы. Именно в бас-

сейнах этих рек в XX веке селевая активность была наибольшей. Эти обстоятельства обусловили беспрецедентные в СССР масштабы мероприятий, осуществленных во второй половине прошлого века, по защите города от селей. За осуществление строительства противоселевого комплекса г. Алматы группа проектировщиков и строителей была удостоена премии Совета Министров СССР.

Город Алматы является самым крупным финансовым, промышленным, научным и культурным центром страны. Численность населения быстро увеличивается, приближаясь к 1,5 млн человек. Стоимость недвижимости, которая не может быть передислоцирована (в случае необходимости) на другую территорию, составляет 15–30 млрд USD. Переселение жителей города на другую, более безопасную территорию потребует затрат 25–50 млрд USD. Таким образом, суммарные потери, вызванные передислокацией г. Алматы, составят примерно 40–80 млрд USD.

Город расположен на двух конусах выноса, на которые в период рисс-вюрмского межледниковья (135–130 тыс. лет назад, когда температура воздуха превышала современное значение на 2–3 ºС [275, 276]) селями за несколько десятков лет было вынесено около 3 млрд $м^3$ наносов [67, 265]. Объем наносов, который накопился в высокогорной зоне бассейнов рек Киши и Улькен Алматы в период вюрмского оледенения и может быть вынесен за 25–100 лет на территорию г. Алматы, составляет, по нашим оценкам, 1,5–2 млрд $м^3$. Для задержания таких объемов селевой массы потребовалось бы построить 150–200 плотин, подобных плотине в урочище Медеу, однако их негде строить. Альтернативой строительству плотин может быть расчистка селехранилищ после задержания селей. Если принять стоимость экскавации и перевозки селевой массы из селехранилищ к местам складирования близкой к 3–5 USD/$м^3$, нетрудно подсчитать, что очистка селехранилищ от наносов, даже только из экономических соображений, более предпочтительна, чем передислокация города.

Однако такая стратегия не обеспечивает надежной защиты восточной части г. Алматы от селей, формирующихся в бассейне р. Киши Алматы (при наличии селезадерживающей плотины только в урочище Медеу), так как возможно повторное формирование катастрофического селя в период очистки селехранилища. Необходимо сооружение второй плотины [272]. Она должна располагаться ниже устья р. Бедельбай (рисунок 13.12). Более точно местоположение плотины определится в ходе проведения технико-экономического обоснования строительства селезащитного комплекса. Эта плотина должна быть основной и работающей в паре с плотиной в урочище Медеу. Материалом для отсыпки плотины могут служить наносы, накопившиеся в долине между створами этих плотин. Образовавшийся котлован увеличит объем селехранилища.

Для пропуска селей из селехранилища, расположенного в урочище Медеу, в селехранилище, образуемое нижерасположенной плотиной, необходимо создать туннель в горе Мохнатке. Туннель должен иметь затвор, перекрывающий проход селей в основное селехранилище, тем самым плотина в Медеу будет подстраховывать его в период очистки. Продукты очистки

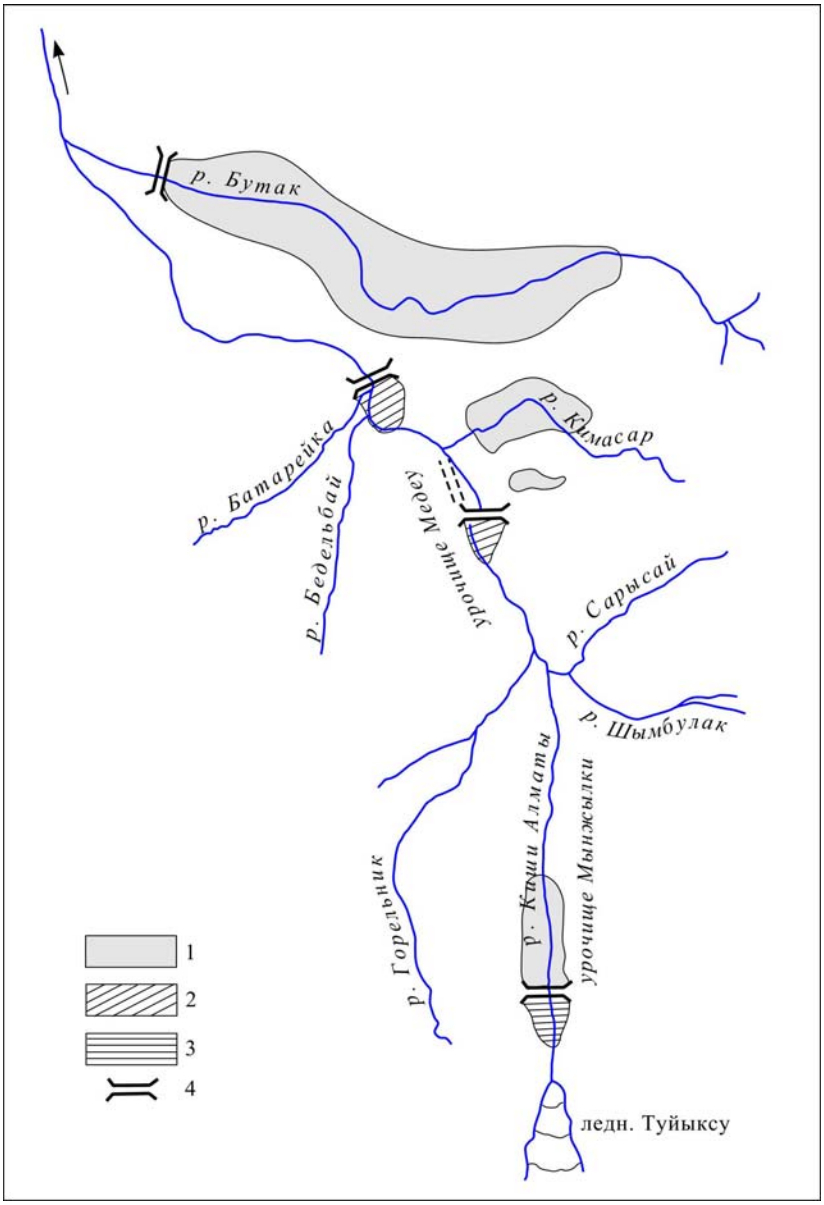


Рисунок 13.12. Схема расположения существующих и предлагаемых селезащитных сооружений в бассейне р. Киши Алматы:
1 – место складирования селевой массы; *2* – селехранилище;
3 – водохранилище; *4* – плотина

предлагается складировать в долине р. Бутак, что предотвратит выход селей, формирующихся в долине р. Бутак, в долину р. Киши Алматы. Рекультивация селевых отложений в долине р. Бутак значительно расширит площади этой долины, пригодные для строительства объектов жилищного и культурного назначения.

Предлагаемая схема защиты нейтрализует негативное воздействие селей, формирующихся выше Ворот Туйыксу, в Чертовом ущелье, селевых очагах Шымбулака, бассейне р. Горельник, а также исключит необходимость проведения работ по сооружению плотины или стабилизации селевых русел в бассейнах рек Кимасар, Бедельбай и Батарейка.

Вторая (альтернативная) предлагаемая схема предусматривает сооружение канала и туннеля для сброса селей, пропускаемых через плотину в урочище Медеу, в долину р. Бутак, где и будет осуществляться складирование селевой массы. Преимуществом этой схемы является исключение затрат на расчистку селехранилищ в урочище Медеу. Если учесть, что стоимость расчистки селехранилищ составит в XXI веке 2–3 млрд USD, второй вариант, требующий больших начальных капиталовложений, может оказаться более предпочтительным.

В работе У. К. Караманова и А. С. Деговца [250] предлагается иной способ защиты, в основу которого положено «… заблаговременное увеличение емкости существующих селехранилищ на Медео, Мынжылках и Большой Алматинке горными выработками (карьерами), не ожидая их заполнения катастрофическими или бытовыми селями …». Авторы этой публикации считают, что созданные селехранилища, рассчитанные на задержание катастрофических ливневых и гляциальных селей с объемом выносов до 8–12 млн $м^3$, явно недостаточны для надежной защиты южной столицы Казахстана от сейсмогенных селей типа 1887 г. Во-первых, как показал опыт землетрясения 1887 г., объемы сейсмогенных селей могут достигать многих десятков миллионов кубометров, поэтому их задержание представляется нереальным. Во-вторых, сейсмогенные сели возникают при землетрясениях силой 10 баллов и более, повторяемость которых один раз в тысячи лет. Как показал опыт землетрясения 1911 г., не все они приводят к формированию катастрофических селей. Сейсмогенные катастрофы, как правило, относят к форс-мажорным обстоятельствам, защита от которых в настоящее время не предусматривается. В-третьих, создание котлована в Медеу резко осложняется близостью к поверхности коренных пород. В-четвертых, при задержании селей в глубоких селехранилищах затвердевание селевой массы до состояния, при котором становится возможной механизированная расчистка с привлечением тяжелой техники, может длиться годы.

Обращаясь к истории строительства и эксплуатации плотины в урочище Медеу, следует признать, что выбор места ее возведения, по современным представлениям, был крайне неудачным. Поскольку считалось, что катастрофические сели – явление крайне редкое (при проектировании принималось, что осадки, подобные выпавшим в 1921 г. и приведшим к катастрофе в г. Верном, образуются один раз в 10 000 лет), проект не отвечал на вопрос: что делать после заполнения селехранилища? Плотина была возведена в самой верхней части низкогорного участка долины р. Киши Алматы, благоприятного для создания селехранилища. Выше по течению реки уклон долины резко увеличивается и строить там плотины нерентабельно.

В 1973 г. эта плотина спасла г. Алматы от разрушения, но селехранилище оказалось заполненным до уровня, не обеспечивающего надежную

защиту города от последующего селя, в неотвратимости которого уже никто не сомневался. В спешном порядке плотину нарастили, и сейчас она способна задержать сель объемом до 12,6 млн м^3. Не исключено, что это произойдет в ближайшие годы. Что же дальше? Снова наращивать плотину и удастся ли это сделать своевременно?

Заполнившееся селехранилище представляет собой потенциальный селевой очаг, искусственно приближенный к защищаемому объекту. Наращивание высоты плотины осуществляется путем отсыпки грунта на селевые отложения предшествовавшего селя, которые сохраняют аномальное увлажнение десятки лет и могут быть разжижены относительно небольшим землетрясением. Следовательно, нельзя исключить возможность сдвига плотины и формирования оползня (селя), последствия которого для г. Алматы будут катастрофическими. Если же учесть, что потенциал селеформирования в бассейне р. Киши Алматы в XXI веке близок к 500 млн м^3, стратегия защиты путем наращивания высоты плотины в урочище Медеу не приемлема. Нельзя допустить и перелив селя через гребень плотины, так как это неизбежно приведет к ее разрушению и вовлечению в селевой процесс всей массы, ранее накопившейся в селехранилище.

Реальными выходами из создавшейся ситуации представляются:

возведение плотины в районе бывшего дома отдыха «Просвещенец» и сброс селей в образуемое им селехранилище через туннель в горе Мохнатке;

сооружение, как минимум, двух быстротоков (что обеспечит возможность их поочередного ремонта) для сброса селей в селехранилище, образуемое плотиной в Просвещенце.

Поскольку трудно представить себе быстроток для сброса селей с расходом тысячи кубометров в секунду и суммарным объемом сотни миллионов кубометров с высоты более 100 м, предпочтительным представляется первый вариант.

Объемы селевой массы, которые будут задерживаться плотинами в урочище Медеу и Просвещенце и складироваться в долине р. Бутак, могут быть значительно снижены в результате реконструкции плотины в урочище Мынжылки. Плотина высотой 17 м создала емкость 0,23 млн м^3. Главная цель реконструкции плотины в урочище Мынжылки – увеличение объема водохранилища. 7 августа 1956 г. из внутриледникового водоема моренно-ледникового комплекса Туйыксу начался выброс воды, сопровождавшийся выносом относительно небольшого объема твердого материала, продолжавшийся около 100 ч. «Количество избыточной по отношению к «норме» воды приближенно оценивается в 1,5–2 млн м^3. Максимальный расход воды в створе Мынжылки оценивается в 25–40 м^3/с» [29]. Приведенные данные свидетельствуют о том, что объем водохранилища, созданный плотиной в урочище Мынжылки, не обеспечивает гарантированный перехват не только селей, но и прорывных паводков.

В ходе реконструкции плотины в урочище Мынжылки объем водохранилища необходимо увеличить до 2,5–3 млн м^3 частично за счет котлована, образуемого при добыче нерудных материалов, используемых для отсыпки плотины в целях наращивания ее высоты. Увеличение объема водохрани-

лища позволит не только перехватывать гляциальные прорывные паводки, но и дождевые паводки, которые в ближайшие десятилетия будут формироваться в высокогорной зоне, что значительно снизит селевую активность бассейна р. Киши Алматы. Это же водохранилище может с успехом использоваться для регулирования ледникового стока для оптимизации подачи воды потребителям. Актуальность такого регулирования будет возрастать по мере уменьшения ледникового стока в ходе деградации оледенения.

Стоимость задержания 1 $м^3$ селевой массы (или воды) плотиной в урочище Мынжылки значительно выше, чем в урочище Медеу, из-за удорожания стоимости строительных работ на высоте более 3000 м. Высокая эффективность функционирования плотины в урочище Мынжылки возможна лишь при условии, что она будет задерживать только паводочные воды. Формирование гляциальных селей в зоне выше 3000 м должно быть исключено. Необходимо проводить работы по предотвращению зарождения и развития водоемов на моренно-ледниковых комплексах.

Особое внимание должно уделяться моренно-ледниковому комплексу ледника Маншук Маметовой, где на высоте 3600 м расположено озеро №6. В случае неконтролируемого опорожнения этого озера с расходом, превышающим критическое значение, на древней морене ледника Маншук Маметовой сформируется сель, объем которого уже в створе плотины в урочище Мынжылки может значительно превысить 2 млн $м^3$. Его дальнейшее развитие способно привести к увеличению объема селя в створе плотины в урочище Медеу до 10 млн $м^3$ и более [22]. Объясняется это высоким содержанием воды и льда в грунтах морен ледников Маншук Маметовой и Туйыксу, что может способствовать развитию цепного селевого процесса. Контролируемое опорожнение озера №6 – первоочередная задача по предотвращению селевой опасности гляциального генезиса в бассейне р. Киши Алматы.

Увеличение температуры воздуха на 2–3 ºС к 2050 г. приведет к многократной активизации селей дождевого генезиса в высокогорной зоне, поэтому уже сейчас необходимо развернуть работы по мелиорации высокогорной зоны. В настоящее время подобные работы не проводятся из-за отсутствия научного и методического обоснования.

Программой «Защита населения и объектов экономики г. Алматы от опасных геологических и гидрологических явлений, чрезвычайных ситуаций экзогенного характера», утвержденной решением №192 XIX сессии Маслихата г. Алматы III созыва, предусматриваются работы по строительству каскада защитных сооружений на реках Бедельбай и Батарейка. Наибольшую угрозу сели, проходящие по руслам этих рек, представляют автомобильной дороге Алматы–Медеу. Просто и экономически целесообразно эта проблема решается соединением русел этих рек в единое русло и пропуском воды и селей над автодорогой Алматы–Медеу с помощью селеспусков, широко применяющихся для защиты железных дорог. Орографические и гидрологические условия для реализации такого проекта практически идеальные: высокий левый (орографически относительно

р. Киши Алматы) берег, врезаясь в который речки Бедельбай и Батарейка впадают в р. Киши Алматы, и русло р. Киши Алматы с правой (орографически) стороны дороги, куда и будут сбрасываться вода и селевая масса с селеспуска. Пример селеспуска приведен на рисунке 13.13.

Рисунок 13.13. Селеспуск над железной дорогой (фото из [277])

Как показывает опыт последних десятилетий, сели в бассейне р. Бутак образуются в результате оползневых процессов на крутых склонах временных водотоков, впадающих в русло основной реки. Роль русловых отложений р. Бутак в формировании селей крайне незначительна, поэтому стабилизация русла р. Бутак, как это предусматривается программой, вряд ли решит проблему. Имеет смысл проработать вариант защиты Бутаковского ущелья с помощью небольших плотин-барражей, установленных там, где имеется возможность их расчистки в межселевые периоды.

Западная часть г. Алматы расположена на конусе выноса р. Улькен Алматы, бассейн которой включает три крупных бассейна рек Кумбель, Озерная и Проходная. В XX веке наибольшая селевая активность наблюдалась в бассейне р. Кумбель, где образовалось несколько катастрофических селей.

Значительно меньшую угрозу для г. Алматы представляет бассейн р. Озерная, сели которого аккумулируются в котловине озера Улькен Алматы. По данным [278], озеро образовалось 20–30 тыс. лет назад в результате грандиозного завала, вызванного сильным землетрясением. Это озеро имело объем 150–200 млн м^3, его прорыв сопровождался селем и наносонесущим паводком, отложения которых прослеживаются как 2–5-метровая

толща аллювия (включающего в себя глыбы размером более 1,5 м в верхней части конуса выноса р. Улькен Алматы) на большей части территорий конусов выноса рек Улькен и Киши Алматы. В ходе эрозионных процессов, вызванных опорожнением озера, произошло формирование, а затем частичное обрушение стенок прорана, в результате чего образовалась современная озерная перемычка. За прошедшее с тех пор время озерная котловина на 75 % заполнилась селевыми и аллювиальными отложениями, объем воды в озере около 10 млн $м^3$. Как естественное селехранилище озерная котловина способна вместить 20–25 млн $м^3$ селевых отложений.

Заполнение озерной котловины селевыми отложениями потребует решения сложных проблем, обусловленных особенностями геологического и геоморфологического строения района. Неконтролируемый перелив селя через гребень озерной перемычки приведет к возникновению селевого очага, потенциальные возможности которого – сотни миллионов кубометров рыхлообломочных пород, подготовленных к участию в селевых процессах. Но даже наращивание озерной перемычки на 100–150 м не решит проблемы, опасность со временем будет только возрастать.

Селевая активность в бассейне р. Проходная в последние 150–200 тыс. лет была незначительной. Вследствие этого в долине реки сохранились большие объемы рыхлообломочных пород в виде древних и современных морен, что свидетельствует о высокой потенциальной селевой активности этого бассейна.

Как отмечалось, увеличение селевой активности в ходе глобального потепления способно привести к выносу на конус выноса р. Улькен Алматы не менее 1 млрд $м^3$ наносов за короткий промежуток времени. В условиях глобального потепления мощные сели дождевого генезиса могут формироваться ежегодно и даже неоднократно в течение года. Противостоять такой селевой активности способен лишь комплекс селезащитных мероприятий (рисунок 13.14).

Первоочередной задачей является строительство (подобно тому, как это рекомендуется для бассейна р. Киши Алматы) второй плотины, расположенной ниже устья р. Проходная. Эта плотина должна быть оборудована затворами для пропуска селей в существующее селехранилище и подстраховывать его в период очистки. При прохождении селя в этот период селевая масса будет аккумулироваться в селехранилище, расположенном выше. Основное назначение этих плотин – задержание селей, формирующихся в бассейнах рек Теребутак, Проходная, Аюсай и частично Кумбель.

Важную роль должна сыграть плотина, которую необходимо возвести в троговой долине р. Кумбель выше Кумбельского селевого очага. В этом же районе целесообразно перебросить сток р. Мынжылки в русло р. Кумбель, что позволит осуществить перехват водных паводков и небольших селей, формирующихся на склонах хребта, разграничивающего бассейны рек Киши и Улькен Алматы. Плотина в троговой долине р. Кумбель сделает возможным не только перехват гляциальных прорывных паводков, образующихся на моренно-ледниковых комплексах ледников №98–101 [279], но и дождевых паводков, формирующихся в этом бассейне на высотах,

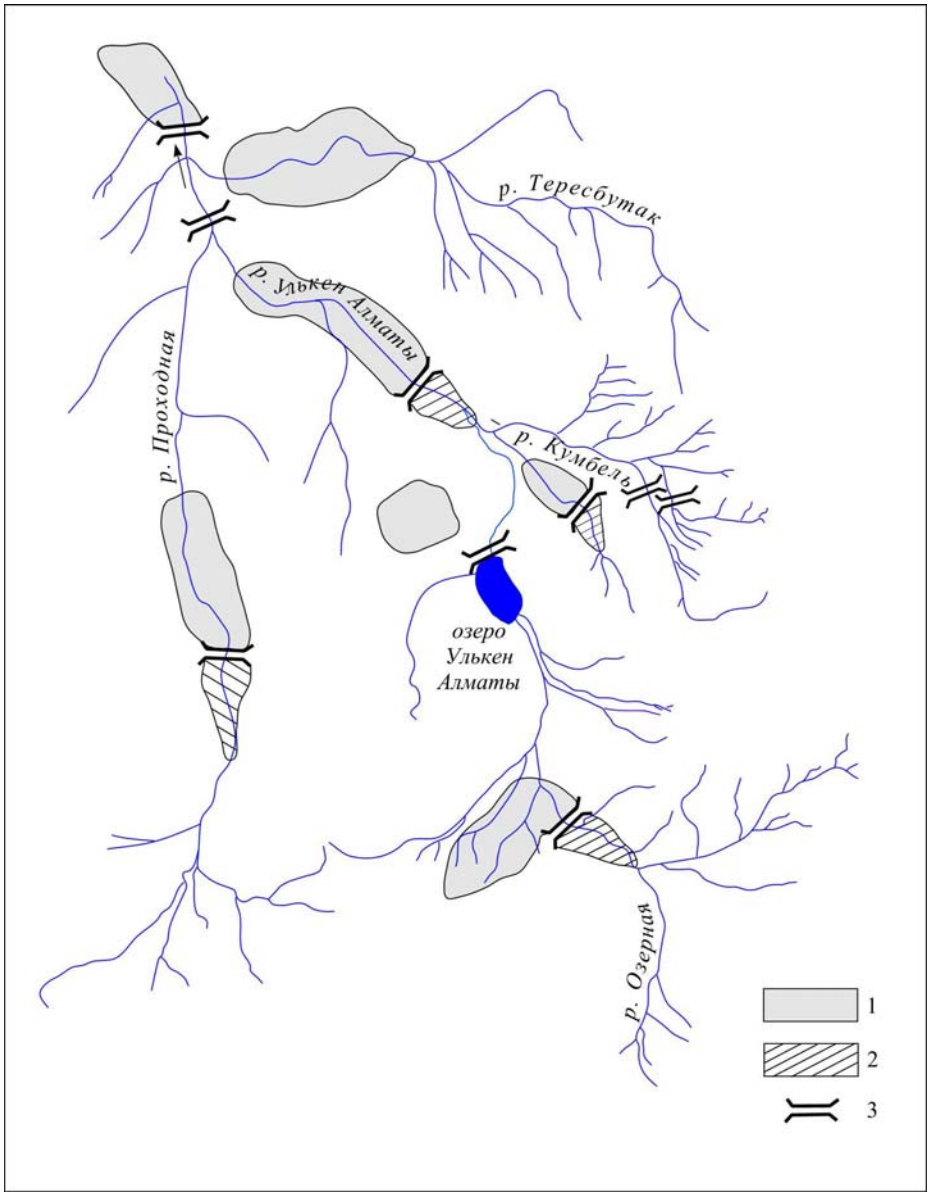


Рисунок 13.14. Схема расположения существующих и предлагаемых селезащитных сооружений в бассейне р. Улькен Алматы:
1 – место складирования селевой массы; *2* – селехранилище; *3* – плотина

превышающих 3000 м. Это значительно ослабит селеформирование в наиболее активном в настоящее время селевом бассейне. Регулируемый водовыпуск из емкости, образуемой обсуждаемой плотиной, сделает возможным рациональное использование талого и дождевого стока с большей части бассейна. Необходимо провести исследования в целях оценки селевой активности бассейна р. Шукыр и целесообразности сооружения плотины в ее бассейне.

Продлению существования озера Улькен Алматы как потенциального селехранилища, аккумулятора воды для получения электроэнергии и питьевой воды, объекта для организации отдыха и туризма может послужить сооружение плотины на р. Озерная на высоте около 3000 м, где долина расширяется и имеет незначительный уклон. Наличие автомобильной дороги, ведущей на перевал Озерный, является благоприятным обстоятельством для возведения этой плотины. Назначение плотины – перехват гляциальных прорывных паводков и дождевых паводков, формирующихся на южных склонах пика Советов, в долине р. Кызылсай, моренно-ледниковых комплексах ледников Городецкого, №86, Черный, №84, Перевальный, №82 и 83 [279]. Наличие регулируемого водовыпуска на этой плотине значительно расширит возможности управления водными ресурсами бассейна р. Озерная. По мере заполнения котловины озера Улькен Алматы наносами его функции как естественного селехранилища могут поддерживаться наращиванием высоты озерной перемычки или удалением наносов из озерной котловины, возможно и их совмещение.

Оледенение бассейна р. Проходная крайне незначительно, поэтому основную опасность здесь в ближайшие десятилетия будут представлять дождевые сели. Возможность и целесообразность строительства плотин в высокогорной зоне бассейна р. Проходная с целью задержания дождевых паводков могут быть определены после специальных полевых исследований.

Важнейшей составной частью мероприятий по уменьшению селевой активности в бассейнах рек Кумбель, Озерная и Проходная должны стать работы по предотвращению зарождения и развития водоемов на моренно-ледниковых комплексах, превентивному опорожнению селеопасных озер, а также по мелиорации стартовых зон селей дождевого генезиса. Существенный вклад в уменьшение селевой активности может внести возобновление агролесомелиоративных мероприятий как в высокогорной, так и в средне- и низкогорной зонах. К настоящему времени в этой области накоплен значительный опыт [280–285]. Однако различные геолого-геоморфологическое условия северного склона Иле Алатау и климат потребуют проведения дополнительных научно-исследовательских работ.

13.3. Концепция защиты районных центров и крупных населенных пунктов

На конусах выноса рек северного склона Иле Алатау расположено несколько районных центров Алматинской области и крупные населенные пункты, численность населения в которых превышает 10 тыс. человек. Большая часть этих населенных пунктов в определенной мере защищена от воздействия селей. Однако, как было показано, степень их защищенности совершенно не адекватна существующим угрозам даже в условиях современного климата. При потеплении климата в описываемом регионе даже на 2–3 °С угроза селей возрастет в десятки раз. Стратегия защиты от селей, рекомендуемая для г. Алматы, вряд ли оправдана для защиты населенных пунктов, где относительно небольшая численность населения и стоимость

недвижимости. В последнее время в средствах массовой информации поднимается вопрос о нецелесообразности увеличения численности населения г. Алматы из-за неблагоприятной экологической ситуации, прежде всего высокой степени загрязненности воздуха выхлопными газами автомобилей, обусловленной низкой естественной проветриваемостью. В качестве альтернативы расширения городской территории Алматы выдвигается идея создания современных городов-спутников Алматы на территории городов Шамалган, Каскелен, Талгар, Есик и др. Принятию программы строительства городов-спутников должен, по нашему мнению, предшествовать этап экономической экспертизы, важнейшим элементом которой является технико-экономическое обоснование защиты территорий от селей в условиях глобального потепления.

При невысокой стоимости земли на этих конусах выноса перспективной стратегией защиты от селей могут стать отвод части территории конусов выноса под отложение селей или пропуск селей через городскую зону с тем, чтобы отложение селевой массы происходило в нижней части конусов выноса. Выбор той или иной стратегии определяется в значительной мере историческими условиями урбанизации территорий, подверженных воздействию селей.

Г. Талгар. Районный центр г. Талгар расположен в восточной части верхней трети конуса выноса р. Талгар. Об исключительно высокой селевой активности бассейна р. Талгар в рисс-вюрмском межледниковье свидетельствуют большой объем конуса выноса, а также практически полное отсутствие в долинах рек Левый, Средний и Правый Талгар морен рисского оледенения.

На топографической карте относительно слабая кривизна, а иногда даже отрицательная форма горизонталей на конусе выноса р. Талгар (севернее г. Талгар) говорит о том, что на последнем этапе формирования современного рельефа конуса выноса отложение селей на его восточной части оказалось более предпочтительным по сравнению с западной. Вследствие этого высотные отметки восточной части конуса выноса оказались выше западных на одном и том же удалении от вершины конуса выноса. Это затрудняет пропуск селей через территорию г. Талгара по современному руслу реки и делает более предпочтительной, по нашему мнению, рекомендацию по использованию западной части конуса выноса для отложения селей после того, как селехранилище, образованное плотиной, исчерпает свои возможности.

Для этого еще до заполнения селехранилища необходимо нарастить плотину и построить селенаправляющую дамбу (рисунок 13.15). Длина селенаправляющей дамбы должна отвести вершину вновь образуемого конуса выноса. Необходимо решить и проблему, связанную с передислокацией поселков Кзылгайрат, Талдыбулак и Бирлик.

Если по каким-либо причинам течение р. Талгар по вновь образуемому конусу выноса окажется нецелесообразным, необходимо своевременно предусмотреть сооружение гидротехнического комплекса, обеспечивающего течение р. Талгар по старому руслу после прохождения очередного селя.

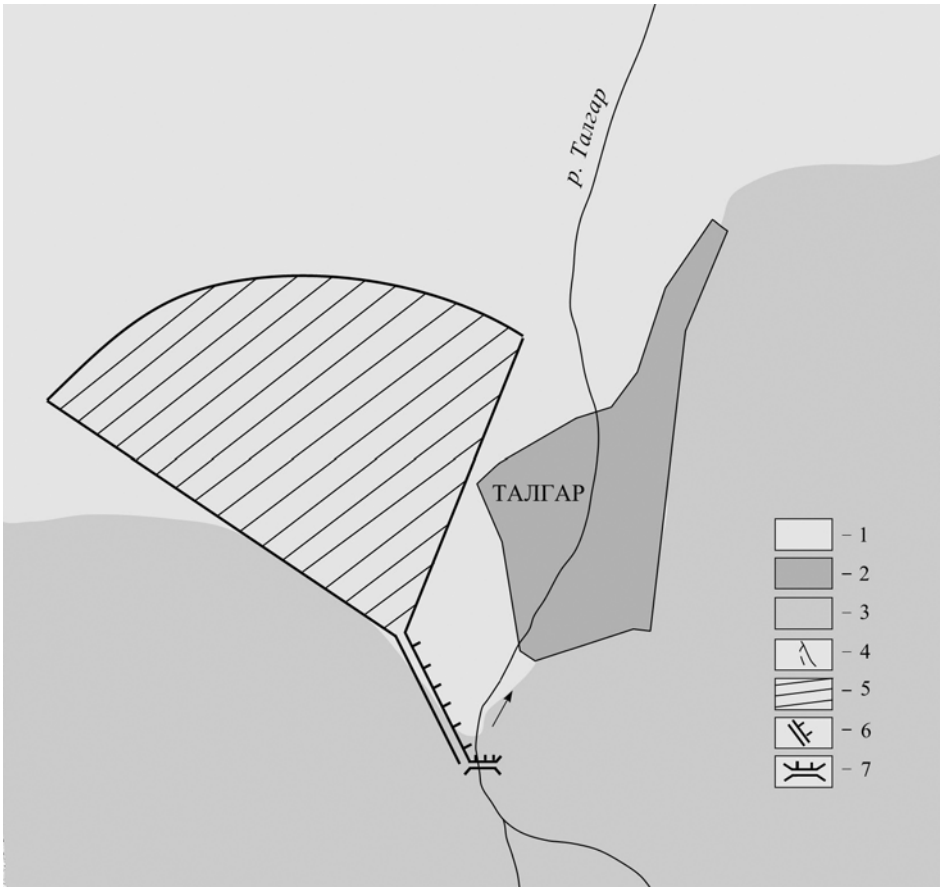


Рисунок 13.15. Схема конуса выноса р. Талгар:
1 – конус выноса; *2* – населенный пункт; *3* – горная зона; *4* – река;
5 – место отложения селей; *6* – селенаправляющая дамба; *7* – плотина

Селевая активность бассейна р. Талгар может быть (по крайней мере, на какой-то временной интервал) снижена строительством плотины в бассейне р. Левый Талгар на высоте около 2650 м, где имеются благоприятные условия, созданные моренами ледников, спускающихся с перевала Комсомольский, пиков Аристова и Маншук Маметовой. Осложняющим фактором является высокая стоимость доставки оборудования и строительных материалов.

Г. Есик. Город расположен на конусе выноса р. Есик, бассейн которой характеризовался большой селевой активностью как в последние десятилетия, так и в период рисс-вюрмского межледниковья. Следует, однако, уточнить, что высокая селевая активность в последние десятилетия была обусловлена прорывами одного и того же моренного озера. Прорыв происходил в результате закупорки подземных каналов стока, по которым талые воды вытекали из котловины, образовавшейся в результате таяния открытой части языка ледника Жарсай [21, 26, 286]. Высокая селевая активность

бассейна р. Есик объясняется мощными древними и современным оледенениями, высокой энергией рельефа, последствиями активной тектонической деятельности на территории этого бассейна. Все это проявляется в мощности морен, большом количестве осыпей, часто спускающихся до дна долин, что не характерно для северного склона Иле Алатау в целом.

Состояние ледниковой системы бассейна р. Есик, современные темпы дегляциации северного склона Иле Алатау и прогнозы ее на ближайшие десятилетия позволяют утверждать, что главную опасность в предстоящей активизации селей в этом бассейне будут представлять сели дождевого генезиса. Конечно, оставлять без внимания возможность формирования селей гляциального генезиса не допустимо.

Потенциальная селевая активность бассейна р. Есик столь велика, а орография долины реки неблагоприятна для проведения противоселевых мероприятий, что защита от селей в горной части бассейна практически невозможна или экономически нецелесообразна. Обеспечение безопасности г. Есика может быть достигнуто только пропуском селей через верхнюю треть конуса выноса, на которой расположен город. Для этого в верхней части конуса выноса необходимо построить плотину, сочленив ее с каналом (рисунок 13.16), либо пропускать сели по канализированному руслу реки, обеспечивающему надежный пропуск грязекаменных селей с расходом 5–10 тыс. $м^3/с$.

Строительство плотины позволит защитить г. Есик от селей, формирующихся в бассейнах рек Микушинсай и Кепесай, Бескене (образующейся после слияния рек Тойсай и Прямая Щель).

В связи с очень высокой потенциальной селевой активностью бассейна р. Есик считаем нецелесообразным делать крупные капиталовложения в долговременный бизнес на территории конуса выноса этой реки до утверждения государственными органами Генерального плана защиты от селей г. Есика и прилегающей к нему территории. Объясняется это тем, что (с большой степенью вероятности) под складирование селевых отложений уже в первой половине XXI века придется выделить значительную часть площади конуса выноса.

Объем селей, которые будут формироваться в бассейне р. Есик в XXI веке, будет на порядки превышать объем селехранилища, образуемого плотиной на озере Есик. Во избежание разрушения плотины и, как следствие, выноса накопившихся за ней в течение голоцена наносов необходимо нарастить плотину и построить обводной канал, по которому будут проходить сели после заполнения селехранилища (рисунок 13.17).

Если железобетонное сквозное сооружение, расположенное в 2 км выше озера Есик, не защитить от динамического воздействия валунов и глыб и не снабдить селеспуском, первым же крупным селем оно будет разрушено, а накопившийся в верхнем бьефе рыхлообломочный материал будет перенесен в котловину озера Есик.

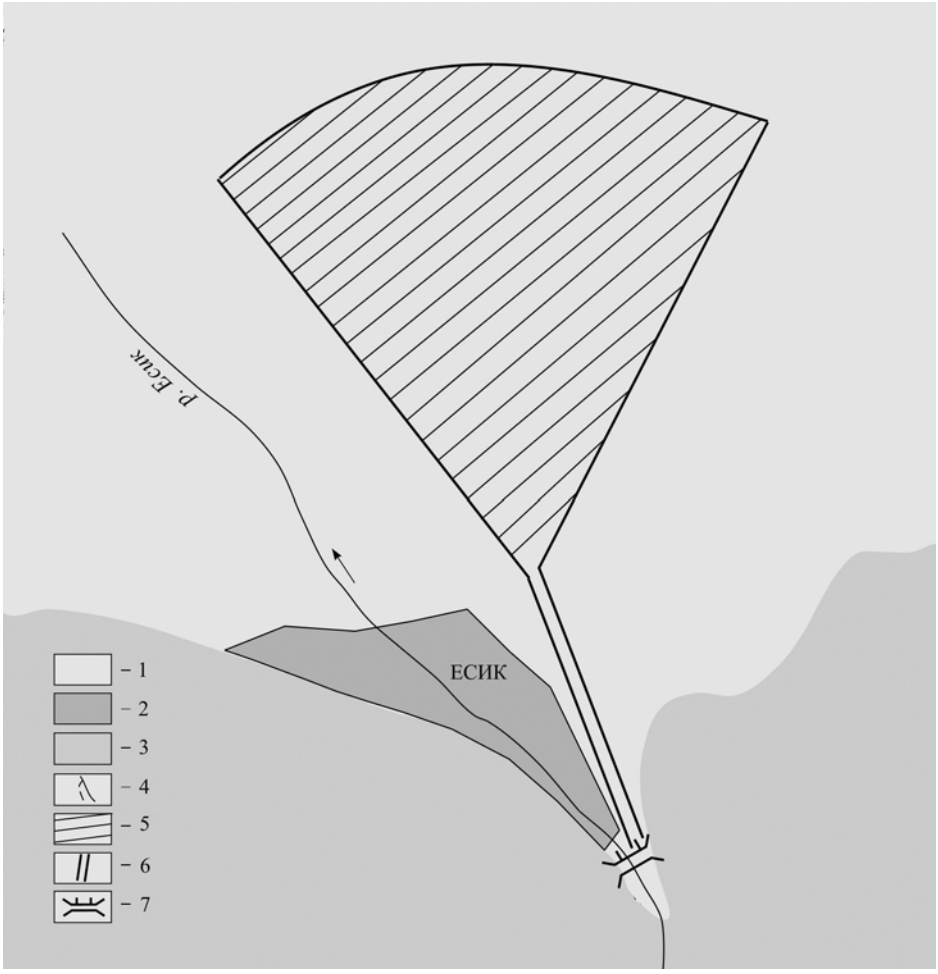


Рисунок 13.16. Схема конуса выноса р. Есик:
1 – конус выноса; *2* – населенный пункт; *3* – горная зона; *4* – река;
5 – место отложения селей; *6* – канал для пропуска селей; *7* – плотина

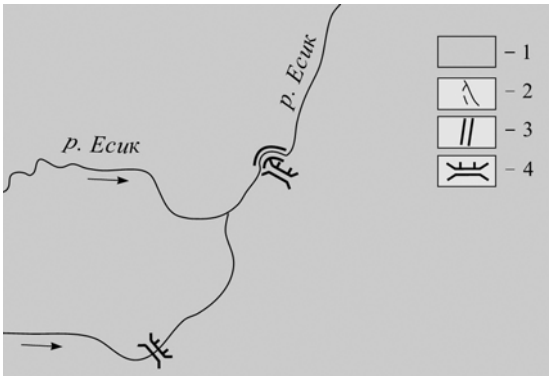


Рисунок 13.17. Схема территории, прилегающей к озеру Есик: *1* – горная зона;
2 – река; *3* – канал (туннель) для пропуска селей в коренный породах; *4* – плотина

С. Турген. Несмотря на то, что село Турген расположено на одном из самых больших конусов выноса Иле Алатау, образованном отложениями селей, сложившаяся ситуация позволяет не спешить с проведением масштабных мероприятий, направленных на борьбу с последствиями прохождения селей. Объясняется это тем, что в формировании селей бассейна р. Турген принимает участие широкий разновозрастный комплекс рыхлообломочных отложений, содержание крупных частиц в котором в среднем невелико по сравнению с таковым в бассейнах, в которых селеформирующие породы преимущественно представлены моренами: для них характерно относительно большое содержание валунно-глыбовых фракций. Именно крупные фракции, составляющие основу отмостки русел горных рек, препятствуют размыву водами рек отложений селей на других конусах выноса северного склона Иле Алатау. Это обстоятельство, вкупе с большой водностью р. Турген при прохождении паводков и относительно небольших селей, формировавшихся преимущественно в среднегорной и низкогорной зонах, привело к образованию в восточной части верхней половины конуса выноса среза глубиной до 20 м, шириной около 200 м и длиной несколько километров. Врез является естественным каналом, по которому сели будут проходить до средней части конуса выноса, где уже в настоящее время начинает формироваться новая вершина конуса выноса, вложенного в основной конус выноса р. Турген. По мере роста вершина вторичного конуса выноса будет смещаться в направлении выхода реки из гор до тех пор, пока врез полностью не заполнится селевыми отложениями. Врез в верхней части конуса выноса р. Турген после возведения капитальной дамбы в нижней части одноименной долины (в районе пос. Таутурген, рисунок 13.18) станет выполнять роль селехранилища с объемом около 20 млн $м^3$.

Анализ сложившейся к тому времени социально-экономической обстановки и степени селевой опасности станет основанием для принятия мер по защите территории конуса выноса р. Турген от селей.

С. Каменка, колхоз им. Чапаева. Проблема защиты от селей, формирующихся в бассейне р. Каргалинка, обусловлена не только обеспечением безопасности с. Каменка и колхоза им. Чапаева. Более оправданным с экономической точки зрения является переселение жителей этих населенных пунктов на безопасные территории.

Восточная часть конуса выноса р. Карагалинка сливается с западной частью конуса выноса р. Улькен Алматы. Поскольку высотные отметки конуса выноса р. Улькен Алматы (из-за задержания селей в селехранилищах и дальнейшего их складирования за пределами конуса выноса) не будут возрастать, конус выноса р. Карагалинка будет разрастаться на восток, перекрывая территорию г. Алматы. Поэтому необходимо защитить территорию г. Алматы, разрастающуюся в западном направлении. Для этого следует построить дополнительную плотину в долине р. Карагалинка и проводить по мере надобности очистные работы, как это рекомендуется для бассейнов рек Улькен и Киши Алматы, или возвести селенаправляющую дамбу для того, чтобы формировать конус выноса р. Карагалинка на территории, расположенной между существующими в настоящее время

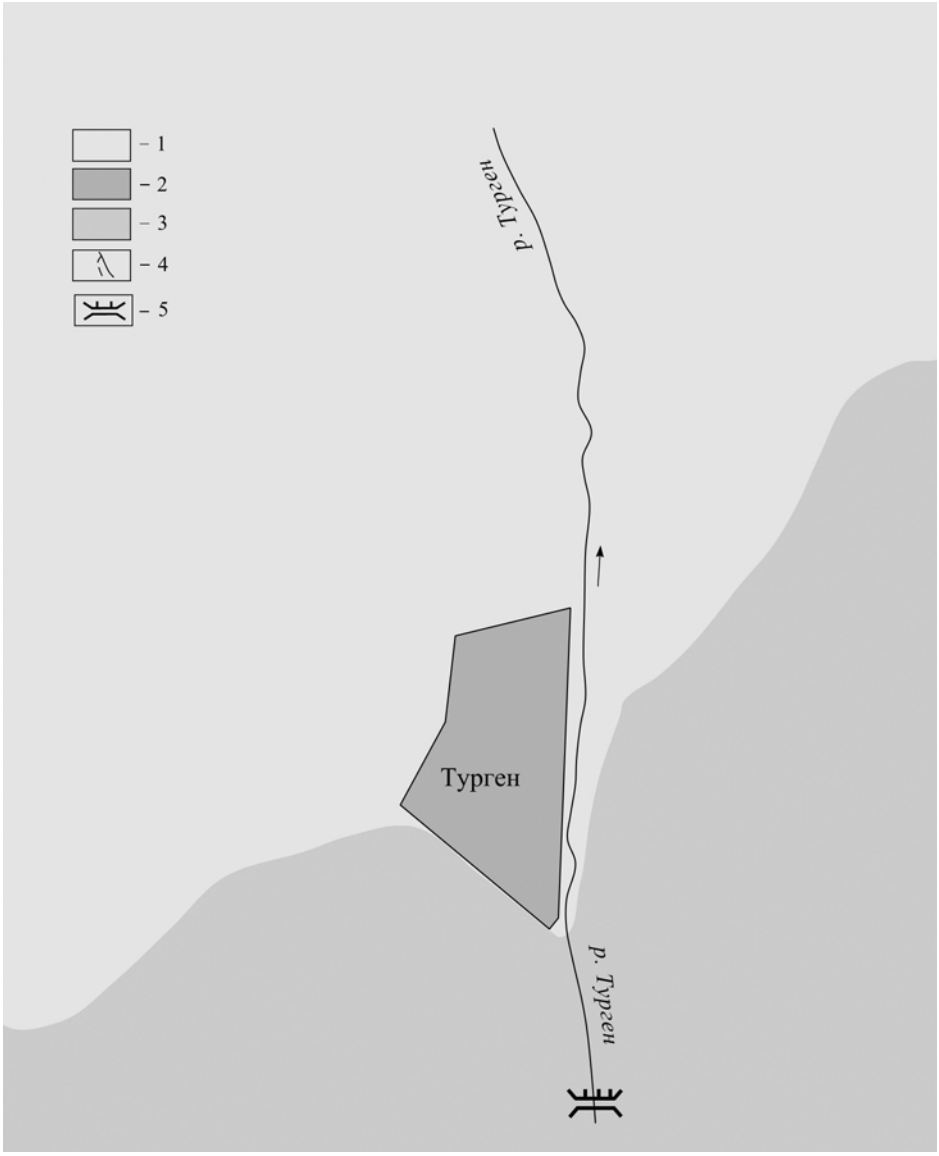


Рисунок 13.18. Схема конуса выноса и нижней части долины р. Турген:
1 – конус выноса; *2* – населенный пункт; *3* – горная зона; *4* – река; *5* – плотина

конусами выноса рек Карагалинка и Аксай (рисунок 13.19). К сожалению, время принятия решения ограничено малой емкостью селехранилища, образуемого плотиной на р. Карагалинка. Сразу после его заполнения селевой массой находящиеся ниже плотины населенные пункты останутся без защиты.

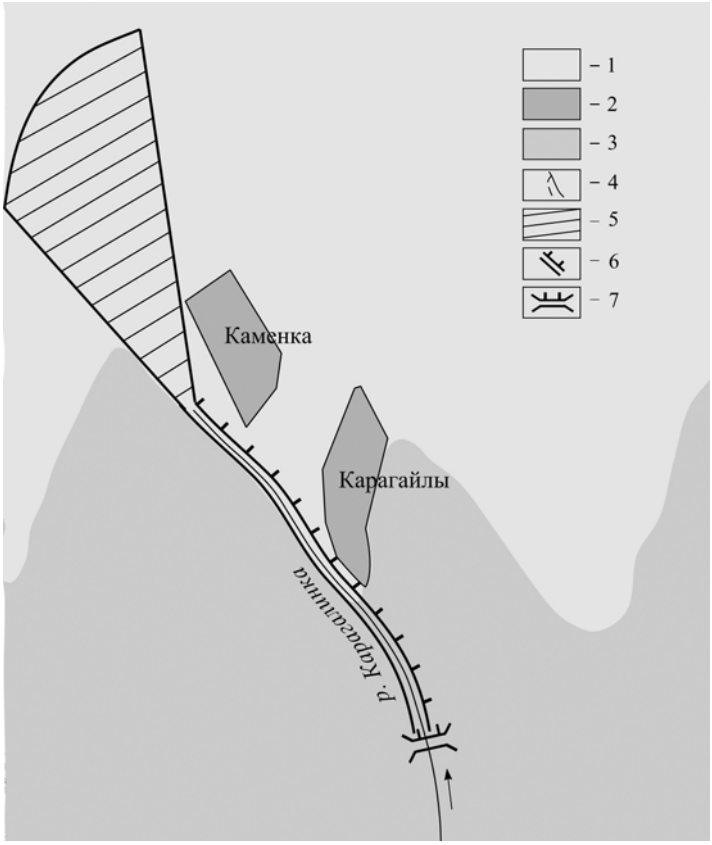


Рисунок 13.19. Схема конуса выноса р. Карагалинка:
1 – конус выноса; *2* – населенный пункт; *3* – горная зона; *4* – река;
5 – место отложения селей; *6* – селенаправляющая дамба; *7* – плотина

Поселки Красный Восток и Жанатурмыс. Территория конуса выноса р. Аксай интенсивно застраивается: восточная часть верхней трети конуса представляет собой дачные участки, западная – сельскохозяйственные угодья. Средняя часть конуса выноса занята пос. Жанатурмыс, карьерами нерудных материалов и пос. Красный Восток; нижняя треть конуса – поселками Нижняя Каменка и Аксай, сельскохозяйственными угодьями.

Для защиты перечисленных объектов в первой фазе активизации селей, вызванной потеплением климата, достаточно расширения и углубления русла р. Аксай и создания защитных валов на берегах реки (рисунок 13.20). По мере заполнения карьеров селевой массой и урбанизации территории конуса выноса будет необходимо принимать решение о дальнейшей тактике борьбы с селями. При этом нужно иметь в виду, что вынос селеформирующих пород, сосредоточенных в основном в виде морен в высотной зоне 2500–3400 м, на территорию современного конуса выноса р. Аксай увеличит высотные отметки его поверхности на 10–15 м.

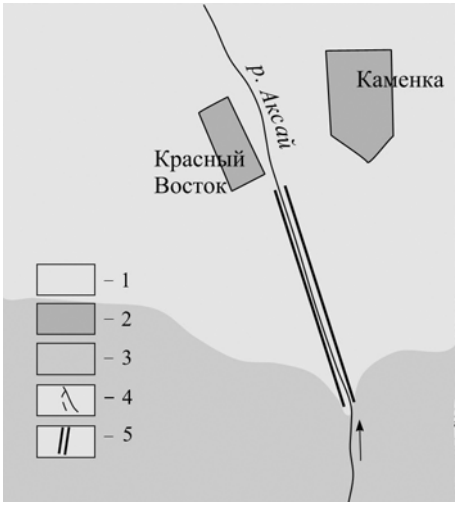


Рисунок 13.20. Схема конуса выноса р. Аксай:
1 – конус выноса; *2* – населенный пункт; *3* – горная зона; *4* – река;
5 – канал для пропуска селей

В долине р. Аксай в высотной зоне 2500–2600 м рельеф местности благоприятен для строительства плотины в целях аккумуляции паводковых вод, формируемых в высокогорной зоне (рисунок 13.21). Плотина должна быть построена на высотных отметках более низких, чем отметки слияния рек Левый Аксай, Аксай и правый безымянный приток, объем водохранилища должен составлять 1–2 млн м^3.

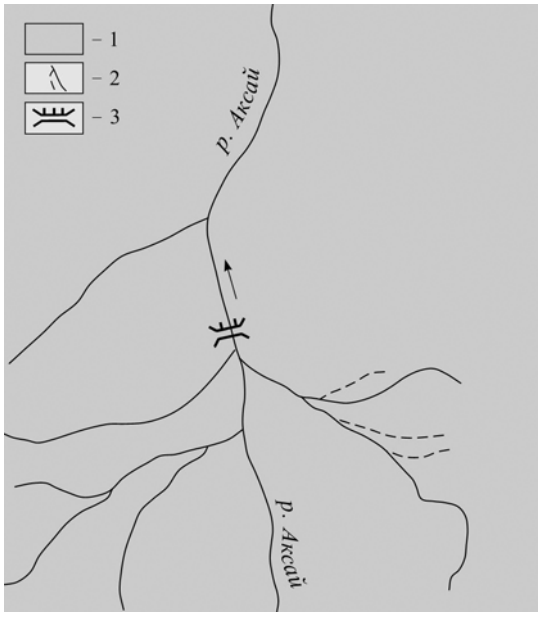


Рисунок 13.21. Схема средней части бассейна р. Аксай:
1 – горная зона; *2* – река; *3* – плотина

Поселки Фабричный и Каргалы. Поселки расположены в западной верхней трети конуса выноса р. Узынкаргалы. Объем конуса выноса этой реки соизмерим с объемом конуса выноса р. Улькен Алматы. Следовательно, селевая активность бассейнов этих рек близка. Относительно небольшая численность населения (13,8 тыс. жителей, данные 1982 г.), высокая потенциальная селевая активность бассейна и неблагоприятные морфометрические характеристики долины р. Узынкаргалы делают нерациональной защиту этих населенных пунктов комплексом, состоящим из двух очищаемых селехранилищ.

Поскольку поверхностный слой восточной части конуса выноса представляет собой лёссовый массив, мощность которого 20–30 м, имеется принципиальная возможность создания селехранилища в этом лёссовом массиве. В верхней части конуса выноса необходимо построить плотину и канал, по которому часть воды р. Узынкаргалы будет подаваться в пионерные канавы, создаваемые в лёссовом массиве (рисунок 13.22). Поскольку лёссовый массив не содержит включений, размеры которых превышают несколько сантиметров, водные потоки прорежут лёссовый массив до речных и селевых отложений рисс-вюрмского межледниковья и таким образом создадут селехранилище. Расстояние между пионерными канавами нужно выбирать так, чтобы в процессе их углубления и расширения произошел вынос лёсса, расположенного между пионерными канавами.

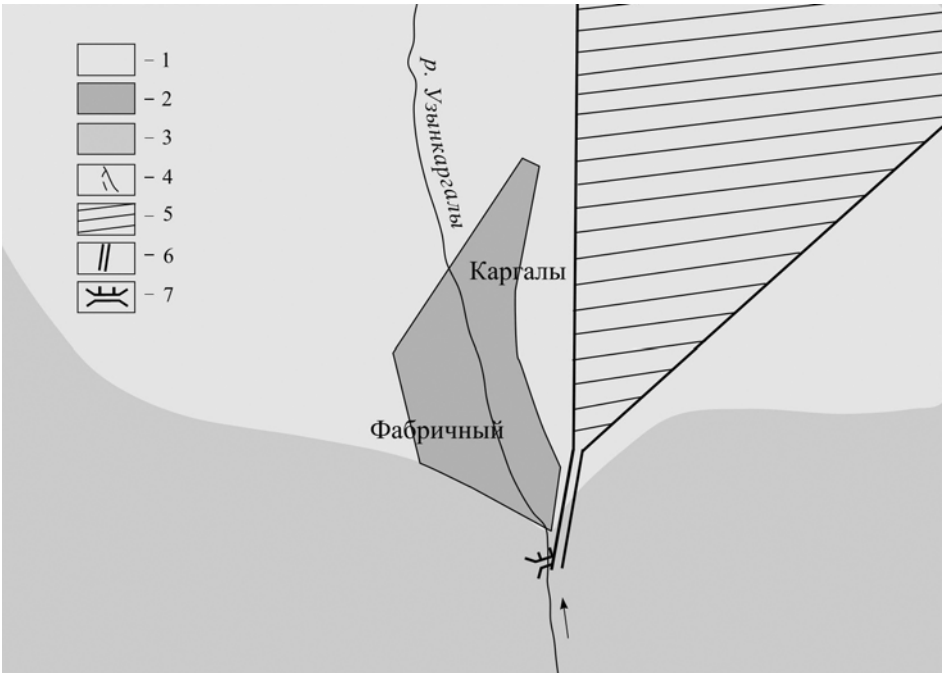


Рисунок 13.22. Схема конуса выноса р. Узынкаргалы:
1 – конус выноса; *2* – населенный пункт; *3* – горная зона; *4* – река;
5 – место отложения селей; *6* – канал для пропуска селей; *7* – плотина

Если 1 м^3 воды будет выносить 0,3 м^3 лёсса, селехранилище с объемом 5 млн м^3 может быть построено (при минимальных затратах) за полгода при расходе водного потока 1 м^3/с.

Объем потенциального селехранилища (на месте существующего в настоящее время лёссового массива) на конусе выноса р. Узынкаргалы превышает 0,5 млрд м^3, что примерно равно возможному объему выноса наносов селями из этого бассейна в ходе глобального потепления.

Поскольку затраты на защиту от селей поселков Фабричный и Каргалы описанным способом относительно невелики, реализовать этот проект можно в ближайшие годы. Опыт его успешного осуществления позволил бы значительно удешевить мероприятия по защите от селей г. Каскелена и с. Шамалган путем создания общего для них селехранилища в лёссовом массиве, расположенном на территории между этими населенными пунктами (рисунок 13.23).

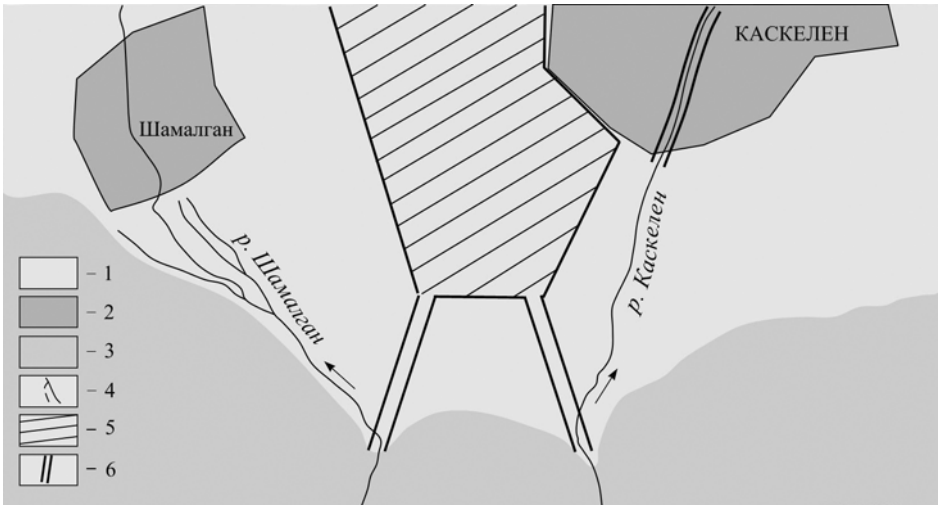


Рисунок 13.23. Схема междуречья рек Каскелен и Шамалган:
1 – конус выноса; *2* – населенный пункт; *3* – горная зона; *4* – река;
5 – место отложения селей; *6* – канал для пропуска селей

Г. Каскелен, с. Ушканыр. Они расположены на конусах выноса одноименных рек, большая часть площади этих конусов выноса до настоящего времени перекрыта мощной толщей лёсса. Относительно малая численность населения, отсутствие градообразующих предприятий, неблагоприятный рельеф местности делают малопривлекательной с экономической точки зрения защиту от селей г. Каскелена и с. Ушконыр в условиях резкой активизации селевой активности с помощью очищаемых селехранилищ.

Возможными вариантами мероприятий по защите от селей могут быть:

пропуск селей через территорию г. Каскелена по каналу, образуемому железобетонными стенками;

сооружение селенаправляющих дамб из местных материалов вдоль южной и частично восточной и западной окраин г. Каскелена и с. Ушконыр;

формирование селехранилища в лёссовых отложениях для аккумуляции селей.

Назначение селенаправляющей дамбы (которую предполагается расположить вдоль южной окраины г. Каскелена) – образование селехранилища. Поскольку ожидаемый вынос наносов из бассейна р. Каскелен близок к 0,5–0,75 млрд м^3, необходим расчет возможности складирования таких объемов селевой массы севернее г. Каскелена при пропуске селей через территорию города по упомянутому каналу. Не исключено, что для защиты города придется использовать как сооружение селенаправляющих дамб, так и частичный пропуск селей через город.

Снизить стоимость сооружения селенаправляющей дамбы можно поэтапным увеличением ее высоты (по мере заполнения селехранилища), как это делается для увеличения объема хвостохранилищ.

Перспективным представляется вариант создания селехранилища, о котором шла речь при защите пос. Фабричный.

13.4. Необходимость модернизации нормативных документов

Эффективность противоселевых мероприятий в значительной мере зависит от качества нормативных документов, регламентирующих проектирование, строительство и эксплуатацию селезащитных сооружений. Опыт проектирования и эксплуатации селепредотвращающих, стабилизирующих, селезадерживающих, селенаправляющих и селепропускных сооружений в Казахстане свидетельствует о том, что действующие нормативные документы морально устарели, их содержание не учитывает специфики селевых явлений, в них отсутствуют разделы, посвященные предотвращению селей, вызванных человеческим фактором. Это приводит к человеческим жертвам и ущербу, исчисляемому десятками миллионов долларов, и создает предпосылки для потенциальных катастроф [49, 91].

На необходимость создания нормативных документов (СНиП), базирующихся на последних достижениях науки и мировом опыте эксплуатации селезащитных сооружений, на протяжении десятилетий обращали внимание ведущие специалисты СССР в области селей. В 1979 г. заместитель министра мелиорации и водного хозяйства СССР Б. Г. Штепа писал: «Нельзя признать удовлетворительным и положение с разработкой и изданием необходимых нормативных документов» [287]. В 1981 г. профессор МГУ, председатель селевой комиссии АН СССР С. М. Флейшман, к.г.-м.н. Б. Н. Иванов, заместитель начальника Казселезащиты А. Ю. Хегай акцентировали внимание на том, что «создание нормативных документов для противоселевого проектирования следует считать задачей номер один ...» [288]. Спустя 7 лет, в 1988 г. А. Ю. Хегай и Н. В. Попов вновь возвращаются к этой проблеме: «До сих пор у нас нет нормативных документов по расчетам параметров возможных селей, ущерба от стихийных явлений и эффективности защитных работ» [289]. В 1990 г. ведущий специалист Казселезащиты, к.г.н. Н. В. Попов писал: «Существенным образом затрудняет разработку рекомендаций защитных мер и проектирование инженерных

сооружений отсутствие необходимой расчетной базы и нормативных документов ...» [290].

В настоящее время мероприятия по защите от селей в Казахстане регламентируются нормами и правилами, представляющими собой усеченные варианты СНиП, разработанных в СССР в 80-е годы, в которых не учтен опыт проектирования, строительства и эксплуатации селезащитных сооружений последних десятилетий, а также проблемы, обусловленные изменением климата.

В 2001 г. на это указывается и в письме главного инженера ЗАО «Казгидропроект» И. Я. Вильковиского директору КазНИИМОСК М. Ж. Бурлибаеву: «ЗАО «Казгидропроект» полностью разделяет Вашу точку зрения о необходимости переработки устаревших документов СН 518-79, ВСН 03-76, П-814-84 с учетом проведенных Вашим и другими институтами исследований в 1985–2000 гг., во многом изменивших ранее существовавшие представления о механизмах селеобразования, возможных масштабах селевых явлений и методах селезащиты, а также практике проектирования, строительства и эксплуатации селезащитных сооружений в Казахстане и других селеопасных районах. В упомянутых выше нормативных документах из-за недостаточной изученности селей не нашли отражение многие важнейшие вопросы проектирования или по ним даны неверные рекомендации. Коренная переработка нормативных документов обусловлена необходимостью как проектирования противоселевых объектов, так и проверки достаточности и надежности противоселевых мероприятий на территории РК». В цитируемом письме приводится и перечень дополнительных вопросов, которые должны найти отражение в новых нормативных документах.

Крупнейшим недостатком действующих нормативных документов является отсутствие требований о необходимости разработки проектной документации, регламентирующей мероприятия, проводимые после заполнения селехранилищ. Заполненное селехранилище становится потенциальным очагом селеформирования, расположенным, как правило, в непосредственной близости от защищаемых объектов. При этом вероятность гибели людей многократно возрастает из-за малой заблаговременности предупреждения о селевой опасности.

Создание современных СНиП позволит не только усовершенствовать существующие селезащитные сооружения, но и разработать, и внедрить новую стратегию защиты от селей, в основе которой должны лежать превентивные мероприятия по снижению и даже устранению селевой опасности. Новая стратегия защиты от селей будет не только значительно экономичнее реализуемой в настоящее время, но и позволит предотвратить развитие эрозионных процессов, приводящих к опустыниванию и снижению биоразнообразия.

Стоимость создания пакета нормативной документации по проектированию, строительству и эксплуатации селезащитных сооружений, правил проведения превентивных мероприятий, эксплуатации селеопасных объектов не превысит 80–100 млн тенге, что составляет около 20 % от стоимости

убытков, нанесенных только селем 1999 г., или 4 % от стоимости плотины, возведенной на р. Талгар. Экономический эффект будет десятки миллиардов тенге.

Отсутствие правил, регламентирующих работы по превентивному опорожнению водоемов моренно-ледниковых комплексов, привело к тому, что в период проведения работ по опорожнению озера №13 в бассейне р. Кумбель в 1977 г. произошло его катастрофическое опорожнение. В результате образовавшегося селя погибли люди, нанесен большой материальный ущерб.

Отсутствие правил, регламентирующих эксплуатацию селеопасных объектов, привело к катастрофическому опорожнению накопителя сточных вод в пустыне Жаманкум. Сформировавшийся сель стал причиной гибели людей, загрязнения окружающей среды и большого материального ущерба [49].

Отсутствие правил, регламентирующих проектирование и строительство селезащитных сооружений при наличии селеопасных водоемов в горной местности, привело к тому, что плотина в бассейне р. Сарыкан была спроектирована и построена под объем озера в 362 000 м^3, в то время как реально существовало и существует в настоящее время селеопасное озеро с объемом около 1 млн м^3 [25]. Плотины в бассейнах рек Узынкаргалы и Есик были приняты в эксплуатацию в состоянии, далеком от идеального.

Перечень серьезнейших недостатков в проектировании, строительстве и эксплуатации селезащитных сооружений может быть, к сожалению, продолжен. Недостатки в проектировании, строительстве и эксплуатации селезащитных сооружений обусловлены несовершенством действующих нормативных документов. Ущерб, наносимый селями, списывается на форс-мажорные обстоятельства.

Научно-практический потенциал, накопленный за последние десятилетия в области селезащиты, позволяет значительно расширить круг проблем, при решении которых необходимо руководствоваться нормативными документами, имеющими государственный статус. К таким проблемам можно отнести:

перенос населенных пунктов, подверженных воздействию селей, на безопасную территорию;

запрет на строительство населенных пунктов в зонах, подверженных воздействию селей;

отведение части площади конуса выноса под селевые отложения;

сооружение каналов для пропуска селей и постселевых паводков через освоенные (подлежащие освоению) территории, подверженные воздействию селей;

порядок действий государственных органов, ответственных за безопасность населения, в случае разрушения плотин, находящихся в непосредственной близости от населенных пунктов, при переполнении селехранилищ селевой массой.

В настоящее время при проектировании селезащитных сооружений в Казахстане руководствуются СНиПом 2.01.15-90 «Инженерная защита

территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения проектирования» [291]. В этом СНиПе в разделе 3 «Противоселевые сооружения и мероприятия» таблица 1 «Виды сооружений и мероприятий» может быть дополнена следующим:

пункт I «Селезадерживающие»:

селехранилища в лёссах, частично перекрывающих конусы выноса;

пункт V «Селепредотвращающие»:

мероприятия по предотвращению зарождения и развития поверхностных и подземных водоемов на моренно-ледниковых комплексах;

превентивное опорожнение селеопасных водоемов;

перевод подземного стока на поверхностный в селевых рытвинах;

контроль за степенью увлажнения грунтов низкогорной зоны;

пункт VI «Организационно-технические»:

составление карт распространения селей и селевого риска.

В значительной переработке нуждаются подразделы 3.6 и 3.7 СНиПа 2.01.15-90, в которых не учтена возможность значительного увеличения селевой активности, обусловленной изменением климата в XXI веке, а также возможность образования селей различного генезиса (например, дождевого и гляциального) в течение одного селеопасного сезона.

Также в переработке нуждается подраздел 3.10 СНиПа 2.01.15-90, в котором уравнительный уклон селевых отложений в селехранилищах определяется уклоном естественного русла, в то время как он является функцией глубины единовременных селевых отложений и предельного напряжения сдвига селевой массы. Это приводит к недопустимому завышению расчетной емкости селехранилищ и чревато катастрофическими последствиями.

Весьма сомнительной в подразделе 3.13 СНиПа 2.01.15-90 является рекомендация: «Селезадерживающие плотины следует проектировать, как правило, без противофильтрационных устройств …». При наличии пылевато-глинистых фракций в грунтовых материалах, которые используются при возведении насыпных плотин, это может вызвать оползневые процессы в теле плотин и их разрушение. Требуют критического анализа и некоторые другие подразделы раздела 3.

По мнению ТОО «Казгидро», вновь разрабатываемые нормативные документы должны:

дать рекомендации по расчету гляциальных и оползневых селей;

дать критерии выбора расчетной емкости селехранилища, а также необходимого резерва с учетом уравнительного уклона;

дать рекомендации по выбору ширины селесброса;

дать рекомендации по укреплению нижнего бьефа;

оценить возможность разжижения (разуплотнения) грунта в основании при переливе селя;

обосновать число ниток водосброса, дать рекомендации по ограничению высоты башен, защите от наносов и организации отстойников;

дать методику расчета гидрографа селей для расчета селесброса;

дать методику расчета уравнительного уклона в селехранилищах;

описать механизм продвижения селя на предплотинном участке до достижения гребня селесброса, а также при переливе селя через гребень плотины;

обобщить и привести все сведения по характеристикам селей на территории РК.

Если во второй половине XX века основным методом защиты от селей являлось задержание селя, то в XXI веке главенствующая роль в борьбе с селями будет, скорее всего, принадлежать селепредупреждающим мероприятиям. Наряду с продолжением превентивного опорожнения озер моренно-ледниковых комплексов должное внимание необходимо уделять предотвращению зарождения и развития поверхностных и подземных водоемов упомянутых комплексов, выявлению и опорожнению внутриледниковых водоемов, мелиорации стартовых зон селей дождевого генезиса; фитомелиорации в средне- и низкогорной зонах; террасированию склонов в низкогорной зоне; активному воздействию на интенсивность, продолжительность и фазовый состав выпадающих осадков.

Все это станет возможным, если упомянутые мероприятия будут иметь надежное научное обоснование, разрабатывать которое необходимо уже сегодня.

Однако то обстоятельство, что в условиях потепления климата основную опасность будут представлять сели дождевого генезиса, а в обозримом будущем надежное управление интенсивностью и слоем осадков в горных районах представляется проблематичным, роль «абсолютного» оружия в борьбе с селями остается за селехранилищами (водохранилищами), сооружаемыми в высокогорной зоне. В высотной зоне 3000±200 м основных долин мощными ледниками прошлых ледниковых эпох выработаны широкие троговые долины, продольный уклон которых 3–5º. Эти участки горных долин являются оптимальным местом сооружения селехранилищ (водохранилищ). Их емкость должна быть достаточной для задержания, как минимум, одного мощного паводка (объемом 1,5–2 млн м^3) и 2–3 селей (с суммарным объемом 4–5 млн м^3) в год.

Задержание водных паводков (вызванных прорывом водоемов моренно-ледниковых комплексов или выпадением жидких осадков в высокогорной зоне) в таких водохранилищах в значительной мере предотвратит формирование катастрофических селей в высотной зоне 2000–3000 м, где уклоны долин благоприятны для формирования грязекаменных селей и сосредоточены основные объемы морен вюрмского и рисского оледенений (более 90 % катастрофических селей XX века на северном склоне Иле Алатау формировались именно благодаря этим факторам). Наличие регулируемых водовыпусков позволит рационально использовать воду, накопленную в водохранилищах (селехранилищах).

Заполнение селехранилищ грязекаменными селями потребует их расчистки, однако затраты на нее будут минимальными из-за незначительных транспортных расходов: отсыпку материала, извлекаемого из селехранилища, можно производить в нижнем бьефе плотины, объем которого неисчерпаем. Проектирование и строительство селехранилищ в высокогорной

зоне, как минимум, в бассейнах рек Киши и Улькен Алматы, Аксай, Каскелен, Шамалган и Узынкаргалы, необходимо осуществить в текущем десятилетии.

Оптимальные мероприятия по защите от селей населенных пунктов, расположенных на конусах выноса рек Талгар, Есик и Турген (из-за их высокой стоимости), могут быть разработаны только после создания генеральных планов социально-экономического развития упомянутых территорий на ближайшие 100–200 лет.

Существующие ныне селехранилища будут осуществлять защиту нижерасположенных территорий от селей, формирующихся вне зоны «ответственности» селехранилищ, находящихся в высокогорной зоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последние 50 лет могут характеризоваться как время становления селеведения – науки, зародившейся и развивающейся на перекрестках многих наук: геологии, геоморфологии, гидрологии и метеорологии, гляциологии, геодезии и картографии, реологии, механики сплошных сред, строительной механики, физики, прикладной математики и т.д. В силу природных условий Казахстан стал центром научных исследований, проектирования и строительства крупных селезащитных сооружений, защищающих жизнь и хозяйственную деятельность около 2 млн человек.

В результате проведенных исследований установлено, что главными факторами формирования селей являются наличие воды, рыхлообломочных пород, энергии рельефа и его градиента. Сели образуются в результате сдвига и разжижения водонасыщенных грунтов или взаимодействия водных потоков с грунтами. При взаимодействии водного потока с рыхлообломочными породами плотная селевая масса образуется только в ситуациях, при которых частицы грунта перемещаются со средней скоростью потока за счет собственной потенциальной энергии.

Селевая масса представляет собой смесь воды и твердых частиц, размеры которых могут изменяться от долей микрона до 10 м и более. Столь большая разница в размерах частиц приводит к тому, что относительно крупные частицы, находясь в смеси воды с более мелкими частицами, испытывают действие архимедовой силы, определяемой концентрацией и минералогическим составом относительно мелких частиц. Наличие в селевой массе глинистых и других коллоидных частиц придает ей пластические свойства, благодаря которым энергия, необходимая для поддержания частиц во взвешенном состоянии, уменьшается. При относительно большой концентрации коллоидных частиц в селевой массе и ее плотности практически все частицы могут находиться в квазивзвешенном состоянии. В такой ситуации действие кулоновского трения минимизируется и селевая масса приобретает возможность (при достаточной глубине потока) перемещаться за счет ее потенциальной энергии на малых уклонах (единицы и даже доли градуса). Дальность продвижения селевой массы определяется ее объемом и плотностью, шириной селевого потока и его минимальной глубиной, при которой обеспечивается превышение сдвигающей силы над удерживающей.

Крупным этапом в развитии представлений о механизме формирования селей дождевого и гляциального генезисов стали результаты экспериментов КазНИГМИ по воспроизводству селей в реальном масштабе на Шамалганском полигоне в 1972–1978 гг. Было доказано, что взаимодействие сосредоточенных водных потоков с рыхлообломочными породами при достаточных величинах энергии и его градиента приводит к формированию грязекаменных селей (в составе которых могут находиться глыбы с размерами 10 м и более) с плотностью, превышающей 2400 кг/м^3. Подтверждением тому стал сель 1973 г. на р. Киши Алматы. Полученные данные коренным образом изменили стратегию защиты от селей не только гляциального, но и

дождевого генезисов, открыли новые возможности развития теории селевых процессов, в частности теории существования селевой массы и теории управления селевыми процессами.

ТОО «Казгидро» был разработан, а ГУ «Казселезащита» возведен комплекс селезащитных сооружений и проведены мероприятия, обеспечивающие безопасность территории, прилегающей к северному склону Иле Алатау, от воздействия катастрофических селей. Можно констатировать, что в условиях климата XX века задача, поставленная перед упомянутыми организациями, была успешно решена.

Однако было бы непростительной ошибкой приписывать относительно небольшой ущерб, наносимый селями, только деятельности человека. В значительной мере это заслуга и природы. В XX веке только три природных селя (1921, 1973 и 1963 гг.) вышли или могли выйти на предгорную равнину и нанести значительный ущерб. За тот же период времени два селя (1977 и 1988 гг.) имели антропогенный генезис и носили катастрофический характер. Остальные природные сели из-за относительно малых объема и расхода практически не наносили ущерба за пределами русел и пойм рек, а их отложение в большинстве происходило в горных долинах. Следует заметить, что еще меньшая средняя селевая активность имела место в последние 10–12 тыс. лет, последовавших после окончания последней ледниковой эпохи.

Если в результате глобального потепления летняя температура воздуха в горах увеличится на 2–3 ^{o}C, это приведет к многократному росту селевой активности, подобной той, которая имела место в предыдущей межледниковой эпохе 135–130 тыс. лет назад. Тогда за относительно короткий период времени (первые сотни лет) на всей территории г. Алматы средняя мощность селевых отложений составила около 30 м.

Поскольку селевая активность дождевого генезиса может существенно возрасти уже в ближайшие десятилетия, необходимо исправить ошибки в оценках потенциальной селевой активности речных бассейнов, повлекших за собой и адекватную реакцию при проектировании и строительстве крупных селезадерживающих плотин. Не следует забывать и о рисках, связанных с зарождением, развитием и прорывом подземных водоемов моренно-ледниковых комплексов. К настоящему времени способы обнаружения и определения характеристик таких водоемов, методы их безопасного превентивного опорожнения не разработаны. Объем селей, которые могут образоваться при прорыве подземных водоемов, значительно превышают объем селехранилищ, существующих в настоящее время.

Следует совершенствовать методы превентивного опорожнения поверхностных водоемов моренно-ледниковых комплексов, уделяя должное внимание разработке методологии предупреждения их возникновения и развития. Опыт показал, что административно-командный метод управления опорожнением моренных озер может приводить к катастрофическим последствиям. Превентивному опорожнению поверхностных водоемов должно предшествовать научное обоснование необходимости проведения и технологии этих работ, а само опорожнение должно осуществляться при научном сопровождении.

Необходимо разработать методологию оценки рисков (политических, социально-экономических, природных), на основе которой станет возможной разработка стратегии защиты от селей в условиях изменяющегося климата. Первым шагом в этом направлении должна стать разработка современных «Строительных норм и правил, регламентирующих проектирование, строительство и эксплуатацию селезащитных сооружений» (СНиП). Об острой необходимости создания таких СНиП уже на протяжении более 30 лет говорят ученые, проектировщики и строители. Необходимость в безотлагательном решении этой задачи обусловлена и тем, что специалистов, обладающих необходимыми знаниями и опытом, способных быстро и качественно разработать упомянутый СНиП, через 10–15 лет просто не станет.

В преддверии значительного увеличения селевой активности еще до разработки и реализации стратегии защиты от селей в условиях изменения климата требуется разработать проекты мероприятий, которые должны незамедлительно осуществляться после заполнения селехранилищ селевой массой до состояния, не обеспечивающего безопасное задержание очередного селя. Необходимость в разработке таких проектов одновременно с разработкой проектов по созданию селехранилищ представляется очевидной, но на практике эти проекты не разрабатывались, так как реализуемая в настоящее время стратегия защиты от селей базируется на предположении о редкой повторяемости катастрофических селей. Априори можно утверждать, что итоги такого проектирования покажут, что утверждение «все под контролем» слишком оптимистично.

За последние 25–30 лет уровень мировой науки о селях качественно вырос. Об этом свидетельствует и тот факт, что за последние 15 лет состоялось 5 международных конференций, на которых обсуждались вопросы механики селей, их прогноза и оценки риска. В связи с увеличением селевой активности, вызванной потеплением климата, страны Азиатско-Тихоокеанского региона объединяются для обмена идеями и опытом по защите от селей.

Число научных публикаций по проблеме селей возросло, однако они в основном представлены статьями, рефератами и докладами, разбросанными по различным сборникам, периодическим изданиям разных стран. Это затрудняет использование результатов исследований при проведении научно-исследовательских работ, проектировании, строительстве и эксплуатации селезащитных сооружений и в учебных целях.

Как это ни парадоксально, целенаправленная подготовка специалистов по селям в высших учебных заведениях Казахстана и других стран СНГ не ведется. Это усугубляется и отсутствием пособий, в которых излагались бы современные представления о природе селевых явлений, методах прогноза и расчета характеристик селей. Систематизированные пособия для изучения селей, написанные в СССР до 1980 г. С. М. Флейшманом [6] и А. И. Шеко [7], не только морально устарели, но и к настоящему времени стали библиографической редкостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баймолдаев Т., Виноходов В. Казселезащита – оперативные меры до и после стихии. – Алматы: Бастау, 200. – 284 с.
2. Большая Советская Энциклопедия. – М.: Большая Советская Энциклопедия, 1955. – Т. 38. – 668 с.
3. Руководство по организации и проведению работ по изучению селей на территории Республики Казахстан. – Алматы, 1998. – 143 с.
4. Степанов Б.С., Степанова Т.С. Механика селей. – М.: Гидрометеоиздат, 1991. – 380 с.
5. Перов В.Ф. Селевые явления: Терминологический словарь. – М.: МГУ, 1996. – 45 с.
6. Флейшман С.М. Сели. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 312 с.
7. Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. – М.: Недра, 1980. – 296 с.
8. Виноградов Ю.Б., Земс А.Э., Хонин Р.В. Селевой поток 15 июля 1973 г. на Малой Алматинке // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1976. – №1. – С. 60–73.
9. Плеханов П.А., Судаков П.А., Токмагамбетов Г.А. Причины образования и процессы формирования селевого потока на р. Малая Алматинка 15 июля 1973 г. // Вестник АН КазССР. – Алма-Ата, 1975. – №4. – С. 25–35.
10. Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 144 с.
11. Киренская Т.Л., Степанов Б.С., Хонин Р.В. Селевой поток в бассейне р. Большая Алматинка 19 августа 1975 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1977. – №2. – С. 115–119.
12. Степанова Т.С. Цепной селевой процесс и образование очагов // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1989. – №11. – С. 43–48.
13. Голубев Г.Н., Флейшман С.М. Основные механизмы формирования селей и пути их прогнозирования // Селевые потоки и горные русловые процессы: Сб. докладов на X Всесоюзной селевой конференции. – Ереван, 1988. – С. 58–61.
14. Зак А.И. Гидрологические условия формирования селевых потоков на реках Армянской ССР и методика прогноза селеопасных периодов // Труды ЗакНИГМИ. –1974. – Вып. 56. – 190 с.
15. Киренская Т.Л. О прогнозировании ливневых селей в Заилийском Алатау // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1985. – №9. – С. 77–84.
16. Канаев Л.А., Степанов Б.С. Прогноз лавинной и селевой опасности // Труды V Всесоюзного гидрологического съезда. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – Т.7. – С. 326–337.
17. Киренская Т.Л., Данилина Н.А. О долгосрочных прогнозах селевых явлений ливневого происхождения // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1989. – №11. – С. 27–35.
18. Виноградов Ю.Б. Сдвиговый селевой процесс и возникновение очагов // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1989. – №2. – С. 27–39.
19. Степанов Б.С., Хайдаров А.Х., Яфязова Р.К. Механизмы, приводящие к формированию селей дождевого генезиса в высокогорной зоне Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – 2001. – №1–2. – С. 74–81.
20. Черкасов П.А. Грязекаменный поток в долине Малой Алматинки // Известия АН КазССР. Серия геол. – Алма-Ата, 1953. – №121, вып. 16. – С. 118–120.
21. Мочалов В.П., Степанов Б.С. О причинах образования селевых потоков в бассейне р. Иссык // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1980. – №4. – С. 64–68.
22. Безопасность и контроль гляциальных селей в Казахстане. – Алматы: Fылым, 1998. – 102 с.
23. Марков И.Н., Бекаревич В.Е., Толстов М.И., Кострыгин Ю.Н. Некоторые сведения о двух гляциальных селевых потоках Заилийского Алатау // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1983. – №7. – С. 99–106.
24. Шушарин В.И., Марков И.Н. Наблюдения за формированием гляциальных селей в бассейне р. Средний Талгар // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1976. – №1. – С. 98–108.
25. Тихомиров Ю.П., Шевырталов Е.П. Некоторые характеристики гляциального селя, прошедшего в бассейне р. Сарканд // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1985. – №9. – С. 132–138.
26. Попов Н.В. Количественная оценка и причины формирования селей в бассейне реки Жарсай // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1981. – С. 158–166.

27.Земс А.Э. Некоторые количественные характеристики Жарсайского селя 1963 г. на р. Иссык // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1976. – №1. – С. 75–85.

28.Мочалов В.П., Степанов Б.С. О режиме моренных озер и путях их мелиорации // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1980. – №4. – С. 113–119.

29.Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 154 с.

30.Рунич А.А. Снежные сели и их отличия от лавин // Инженерная гляциология: Труды 1-го Всесоюзного координационного совещания по инженерной гляциологии. – Апатиты, 1973. – С. 96–101.

31.Аккуратов В.Н. Основы предсказания некоторых типов лавин // Известия ВГО. – 1960. – №5.

32. Благовещенский В.П. Водоснежные потоки в Хибинах // Исследования снега и лавин в Хибинах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – С. 88–96.

33. Колесников Е.И., Попов В.И. Некоторые сведения о водоснежных потоках в низкогорьях Западного Алтая // Сб. работ Алма-Атинской ГМО. – 1981. – №9. – С. 43–49.

34.Северский И.В. Снежные лавины Заилийского и Джунгарского Алатау. – Алма-Ата: Наука, 1978. – 255 с.

35.Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 528 с.

36.Кеммерих А.О. Селевые паводки на Полярном и Приполярном Урале // Метеорология и гидрология. – 1961. – №3. – С. 35–36.

37.Комлев А.М. Селевые паводки Заполярья // Метеорология и гидрология. – 1951. – №12. – С. 31–32.

38.Нефедов В.Н., Кузнецов К.Л. Водоснежные потоки Магаданской области // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1983. – №7. – С. 106–112.

39.Парамонов Б.А. Причины формирования катастрофического селя в верховьях руч. Жарсай 7 июля 1963 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1976. – №1. – С. 86–87.

40.Беручашвили Г.М., Кокоришвили В.И. Некоторые результаты исследования селевых потоков // Труды КазНИГМИ. – 1969. – Вып. 33. – С. 42–62.

41.Беручашвили Г.М. Метод определения максимальных расходов селевых потоков в момент их возникновения // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1979. – С. 40–55.

42.Винниченко С.М., Лим В.В., Огнев Н.С. Вопросы рационального использования сейсмоактивных горноскладчатых территорий: Обзорная информация. – Душанбе, 1989. – 48 с.

43.Яблонский В.В. Сель в Киеве // Свет (Природа и человек). – 1991. – №7. – С. 32–33.

44.Величайшие катастрофы мира: Энциклопедический справочник / Н.Н. Непомнящий. – М.: Вече, 2006. – 496 с.

45.Geological Survey. Peru Was Hit by Massive Avalanche Triggered by Earthquake // Mineral Information Service California Division. – 1970. – Vol. 23, N 10. – P. 203–207.

46.Lliboutry L. Les catastrophes glaciaires // La Recherche. – Mai 1971. – Vol. 2, N 12. – P. 417–423.

47.Мушкетов И.В. Верненское землетрясение 28 мая (9 июня) 1887 г. // Труды Геол. комитета. – СПб., 1890. – Т.10, вып. 1. – 154 с.

48.Хайдаров А.Х., Шевырталов Е.П. Селевые явления в песках Жаманкум 28–29 января 1988 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1989. – №11. – С. 49–59.

49.Хегай А.Ю. Укрощение «черного дракона». – Алма-Ата: Казахстан, 1988. –72 с.

50. Степанова Т.С. Антропогенные сели // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1992. – №12. – С. 89–101.

51.Перов В.Ф. Селевые явления на территории СССР // Итоги науки и техники. Серия гидрология суши. – М.: ВИНИТИ, 1989. – Т.7. – 149 с.

52.Яфязова Р.К. Природа селей Заилийского Алатау. Проблемы адаптации. – Алматы, 2007. – 158 с.

53.Флейшман С.М. Сели. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 352 с.

54.Современное экологическое состояние бассейна озера Балхаш / Под ред. Т.К. Кудекова. – Алматы: Каганат, 2002. – 388 с.

55.Токмагамбетов Т.Г. Распределение моренных отложений на северном склоне Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2003. – №2. – С. 110–117.

56.Женжурист Э.М. Алма-Атинская катастрофа 8 июля 1921 г. // Вестник ирригации. – Ташкент, 1923. – №1. – С. 27–31.

57.Попов В.И., Степанов Б.С., Мочалов В.П. и др. Селевые явления 3–31 августа 1977 г. в бассейне р. Большая Алматинка // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1980. – №4. – С. 57–63.

58.Щукин И.С. Четырехъязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии. – М.: Советская энциклопедия, 1980. – 703 с.

59.Степанов Б.С., Яфязова Р.К. О влиянии селеформирующих факторов на объемы конусов выноса // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2002. – №4. – С. 116–124.

60.Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Особенности формирования конусов выноса северного склона Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 1995. – №3. – С. 18–28.

61.Степанов Б.С., Хайдаров А.Х., Яфязова Р.К. Свершившиеся и потенциальные постсейсмические катастрофы на Северном Тянь-Шане // Проблемы предотвращения последствий разрушительных землетрясений: Доклады 2-го Казахстанско-Японского семинара. 23–25 сентября 2002 г., г. Алматы. – Алматы: Эверо, 2003. – С. 88–94.

62.EPICA community members Eight glacial cycles from an Antarctic ice core // Nature. – 2004. – V. 429. – P. 623-628 (Pdf файл всей статьи в свободном доступе).

63.Оценка воздействий изменения климата и мер адаптации для прибрежной зоны Каспийского моря и горных районов Южного и Юго-Восточного Казахстана: Резюме для лиц, определяющих социально-экономическую и природоохранную политику. – Алматы: Казахский научно-исследовательский институт мониторинга окружающей среды и климата, 2000. – 49 с.

64.Жандаев М.Ж. Природа Заилийского Алатау. – Алма-Ата: Казахстан, 1978. – 159 с.

65.Илийская долина, ее природа и ресурсы / Под ред. М.И. Ломоновича. – Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1963. – 341 с.

66.Яфязова Р.К. Основные закономерности формирования селевых конусов выноса (на примере северного склона Заилийского Алатау): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Алматы, 1998. – 21 с.

67.Yafyazova, R.K. 2007. Debris cones as a source of information on debris-flow activity. In C.L. Chen & J.J. Major (eds), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment; Proceedings 4th International DFHN Conference, Chengdu, China, September 10-13, 2007:87-93.

68.Яфязова Р.К. Особенности механизмов формирования конусов выноса горных рек // Гидрометеорология и экология. – 1996. – №2. – С. 175–187.

69.Колотилин Н.Ф., Бочкарев В.П., Антоненко Э.М. и др. Инженерно-геологические условия предгорной зоны Заилийского Алатау (Тянь-Шань). – Алма-Ата: Наука, 1967. – 140 с.

70.Яфязова Р.К. Объем конуса выноса как показатель селевой активности // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2002. – №2. – С. 90–99.

71.Яфязова Р.К. О конусах выноса горных рек Заилийского Алатау. – Алматы, 1995. – 8 с.: 4 ил. – Деп. в КазгосИНТИ 30.03.95, №5982-Ка95.

72.Степанов Б.С., Яфязова Р.К. К формированию рельефа северного склона Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2002. – №2. – С. 100–113.

73.Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.13. Центральный и Южный Казахстан. Вып.2. Бассейн оз. Балхаш. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 644 с.

74.Великанов М.А. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1949. – 473 с.

75.Климатология / Под ред. О.А. Дроздова, В.А. Васильева, Н.В. Кобышевой. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 568 с.

76.Jouzel, J., Lorius, C., Petit, J.R., Barkov, N.I. & Kotlyakov, V.M. 1994. Vostok isotopic temperature record. In T.A. Boden, D.P. Kaiser, R.J. Sepanski & F.W. Stoss (eds.), Trends'93: A Compendium of Data on Global Change: 590–602. ORNL/CDIAC–65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., USA.

77.Справочник по климату СССР. Вып.18. КазССР. Ч.IV. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. – Л.: Гидрометеоиздат, 1968. – 550 с.

78.Токмагамбетов Г.А. Ледники Заилийского Алатау. – Алма-Ата: Наука, 1976. – 367 с.
79.Сваричевская З.А. Геоморфология Казахстана и Средней Азии. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1965. – 296 с.
80.Тронов М.В. Ледники и климат. – Л.: Гидрометеоиздат, 1966. – 407 с.
81.Рейнер М. Реология. – М.: Мир, 1979. – 389 с.
82.Флейшман С.М. Селевые потоки и проектирование дорог в районах их распространения. – М.: Трансжелдориздат, 1955. – 148 с.
83.Войнич-Сяноженцкий Т.Г. Некоторые вопросы устойчивости потоков и их свободной поверхности при течении с большими скоростями // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – 1963. – Вып.7.
84.Сергеев Е.М. и др. Грунтоведение / Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С., Осипов В.И., Трофимов В.Т. – М.: Изд-во МГУ, 1971. – 596 с.
85.Горбунов А.П. Каменные глетчеры Заилийского Алатау // Криогенные явления Казахстана и Средней Азии. – Якутск, 1979. – С. 5–34.
86.Вардугин В.Н. Гранулометрический состав рыхлообломочных пород в селевых очагах и на конусах выноса // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1977. – №2. – С. 94–106.
87.Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. – М.: Стройиздат, 1971. – 368 с.
88.Кульчицкий Л.И., Усьяров О.Г. Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород. – М.: Недра, 1981. – 197 с.
89.Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород. – М.: Недра, 1981. – 192 с.
90.Вардугин В.Н., Малахов В.Д. Эффективные методы защиты селевых бассейнов Казахстана. – Алма-Ата: КазНИИНТИ, 1988. – 66 с.
91.Медеу А.Р. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Основы управления. – Алматы, 2011. – Т.1. – 284 с.
92.Marshall P.E. The wearing of beach gravels // New Zealand institute Proceedings. – 1927. – Vol.27. – P. 507–532.
93.Петтиджон Ф.Дж. Осадочные породы. – М.: Недра, 1981. – 751 с.
94.Wadell H. Volume, shape and roundness of rock particles // Geological journal. – 1932. – Vol.40. – P. 443–451.
95.ГСССД 6-78. Вода. Динамическая вязкость в диапазоне давлений от 0 до 100 МПа и температур от 0 до 800 °С. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – С. 8.
96.Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. – М.: Мир, 1976. – 630 с.
97.Chong, T.S., Chrictiansen, E.B., Baer, A.D. Rheology of concentrated suspension // Appl. Polymer science journal. – 1971. – Vol.15. – P. 2007–2021.
98.Великанов М.А. Обоснование гравитационной теории взвешенных наносов // Известия АН СССР. Серия географическая. – 1954. – №4. – С. 349–359.
99.Егиазаров И.В. Обмен опытом гидравлических исследований и работы лабораторий за рубежом // Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. – Л.: Гидрометеоиздат, 1960. – Т.5. – С. 255–262.
100. Херхеулидзе И.И. Основные условия формирования селевых потоков и пределы текучести селевой массы // Труды ЗакНИГМИ. – 1972. – Вып.40(46). – С. 114–133.
101. Гавришина Л.Н. Исследование статического напряжения сдвига вязкопластичесих селевых смесей на моделях: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Алма-Аты, 1985. – 24 с.
102. Херхеулидзе И.И. К вопросу о предельном насыщении селевых потоков твердым материалом // Движение наносов в открытых руслах. – М.: Наука, 1970. – С. 135–140.
103. Виноградов Ю.Б. Основные свойства селевой массы // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1978. – №3. – С. 3–17.
104. Степанова Т.С. К вопросу расчета максимальной плотности грязекаменных потоков // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1980. – №5. – С. 17–26.
105. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.
106. Романовский В.В. Экспериментальное исследование гидравлической крупности наносов // Труды ГГИ. – 1972. – Вып. 191. – С. 111–136.
107. Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 272 с.

108. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1962. – 358 с.

109. Минц Д.М., Шуберт С.А. Гидравлика зернистых материалов. – М.: Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1955. – 112 с.

110. Степанов Б.С. О периоде полураспада селевой смеси // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1977. – №2. – С. 51–53.

111. Великанов М.А. Современные представления о динамической структуре селевого потока // Вопросы геологии Азии. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1955. – Т.2. – С. 397–403.

112. Виноградов Ю.Б. Эрозионно-сдвиговый селевой процесс // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1976. – №1. – С. 114–122.

113. Руководство по изучению селевых потоков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 144 с.

114. Виноградов Ю.Б. О структуре и динамике селевой массы // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1977. – №2. – С. 3–25.

115. Методические рекомендации по гидравлическому расчету селетранспортирующих сооружений. – Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1983. – 74 с.

116. Саноян В.Г. Транспортирующая способность потока в общем случае движения // Эрозионные и селевые процессы и борьба с ними. – 1980. – Вып. 7. – С. 104–118.

117. Саноян В.Г. Определение транспортирующей способности потока применительно к напорному гидротранспорту // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – 1971. – Вып. 57. – С. 4–8.

118. Виноградов Ю.Б. Транспортный и транспортно-сдвиговый процессы // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1980. – №4. – С. 3–19.

119. Мостков М.А. Очерк теории руслового потока. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 224 с.

120. Егиазаров И.В. Влияние широкой смеси наносов и самоотмостки русла на движение и расход наносов (сообщение №1) // Известия АН АрмССР. Серия техн. наук. – 1964. – Т.17. – №2. – С. 29–44.

121. Селевые явления в Узбекистане / П.М. Карпов и др. – Ташкент: Фан, 1976. – 134 с.

122. Bagnold, R.A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in Newnonian Fluid under shear // Proc. Royal Society of London. – London, 1954. – Vol.225 – A, Aug. – P. 50-63.

123. Киренская Т.Л. О критических условиях возникновения эрозионно-сдвигового селевого процесса // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1988. – №10. – С. 31–35.

124. Асатрян Р.Г., Балджян Г.О. О средней скорости движения селевого потока в жестком русле // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1984. – С. 153–164.

125. Степанов Б.С., Степанова Т.С. О физической природе и математической модели процесса трансформации селевых потоков // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1989. – №11. – С. 6–22.

126. Виноградов Ю.Б. К методике расчета характеристик селевых потоков // Труды ГГИ. – 1985. – Вып. 304. – С. 83–89.

127. Степанова Т.С. О принципе пульсации в селевом процессе // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1980. – №4. – С. 24–27.

128. Степанова Т.С. Эскизная модель эрозионно-сдвигового процесса // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1983. – №7. – С. 31–39.

129. Takahashi T. Mechanical characteristics of debris flow // Proc. of ASCE. – 1978. Vol.104 HY 8. – P.1153–1169.

130. Takahashi T. Debris Flow // Ann. Rev. Fluid Mech. – 1981. – Vol.13. – P. 57–77.

131. Земс А.Э., Хонин Р.В., Лаптев В.И. Баланс твердого и жидкого вещества в селевых потоках 1972–1973 гг. в бассейне р. Чемолган // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1976. – №1. – С. 35–44.

132. Киренская Т.Л., Степанова Т.С., Балабаев Ф.Г. Чемолган-78 // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1980. – №5. – С. 64–72.

133. Хонин Р.В., Керемкулов В.А., Мочалов В.П. Третий эксперимент по искусственному воспроизведению грязекаменного потока // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1977. – №2. – С. 57–63.

134. Степанова Т.С. О роли дисперсности селеформирующих грунтов в образовании селей // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1985. – №9. – С. 23–32.

135. Шейдеггер А.Е. Физические аспекты природных катастроф. – М.: Недра, 1981. – 232 с.

136. Киренская Т.Л., Степанов Б.С., Хайдаров А.Х. Капиллярное связывание грунтовых частиц и сдвиговый селевой процесс // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1983. – №7. – С. 70–75.

137. Степанов Б.С. К проблеме прогноза опасных гидрометеорологических явлений // Гидрометеорология и экология. – 1996. – №2. – С. 161–174.

138. Смирнов И.П. Изучение основных элементов селевых паводков // Материалы 4-й Всесоюзной конференции по селевым потокам. – Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1959. – С. 66–72.

139. Иванов Г.В. Данные о динамической структуре селевых потоков // Материалы 4-й Всесоюзной конференции по селевым потокам. – Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1959. – С. 124–131.

140. Киренская Т.Л., Хонин Р.В., Чиркин Ю.Н. О селевых потоках в бассейне р. Кокчека // Труды КазНИГМИ. – 1969. – Вып. 33. – С. 63–72.

141. Виноградов Ю.Б. Модели процессов селеобразования // Труды КазНИГМИ. – 1971. – Вып. 51. – С. 3–12.

142. Киренская Т.Л. Наблюдения и расчет селевых потоков в очагах площадного селеформирования (на примере бассейна р. Кокчека) // Труды КазНИГМИ. – 1971. – Вып. 51. – С. 85–97.

143. Дуйсенов Е. Селевые потоки в Заилийском Алатау. – Алма-Ата: Казахстан, 1971. – 192 с.

144. Вардугин В.Н. Основные физико-механические свойства селеформирующих грунтов и селевых отложений в бассейне р. Чемолган // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1976. –№1. – С. 25–34.

145. А.с. 539220 СССР, М.Кл2 G 01 F 1/66. Способ измерения расхода водных, водных наносонесущих и селевых потоков в необорудованных руслах / Ю.Б. Виноградов, В.А. Красюков и Б.С. Степанов (СССР) / №2127532/10; Заявлено 17.04.75; Опубл. 15.12.76; Бюл. № 46.

146. А.с. 623136 СССР, М.Кл.2 G 01 N 9/00. Способ измерения плотности селевых потоков / Б.С.Степанов и Т.С.Степанова (СССР)/. – №2400770/18-25; Заявлено 23.08.76; Опубл. 05.09.78; Бюл. № 33.

147. А.с. 698505 СССР, М.Кл.2 G 01 S 9/04. Доплеровский измеритель дальности /Б.С.Степанов, В.М.Силлер, П.И.Коваленко и В.А.Красюков (СССР)/. – № 2585600/18-09; Заявлено 01.03.78.

148. Хонин Р.В. Характеристики и распространение очагов селеобразования на северном склоне Заилийского Алатау // Труды КазНИГМИ. – 1971. – Вып. 51. – С. 57–66.

149. Виноградов Ю.Б. Искусственное воспроизведение селевых потоков на экспериментальном полигоне в бассейне р. Чемолган // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1976. – №1. – С. 3–6.

150. Красюков В.А., Степанов Б.С., Степанова Т.С. Приборы для неконтактных измерений некоторых характеристик селевых потоков // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1976. – №1. – С. 203–213.

151. Гагошидзе М.С. Селевые явления и борьба с ними. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1970. – 386 с.

152. Reid, M.E., Iverson, R.M., Logan, M., Lahusen, R.G., Godt, J.W., Griswold, J.P. 2011. Entrainment of bed sediment by debris flows: results from large-scale experiments. In R. Genevois, D.L. Hamilton & A. Prestininzi (eds), Debris-Flow Hazards: Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment; Proceedings 5th International Conference, Padua, Italy, 14-17 June, 2011: 367-374.

153. Степанов Б.С. Основные характристики селевых потоков и селевой массы. Методы измерений // Труды КазНИГМИ. – М.: Гидрометеоиздат, 1982. – 137 с.

154. Степанов Б.С. Заполнение селехранилищ вязкопластическими селевыми смесями // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1988. – №10. – С. 44–53.

155. Григорян С.С., Иоселевич В.А. Механика грунтов // Механика в СССР за 50 лет: Механика деформируемого твердого тела. – М., 1972. – Т.3. – С. 203–226.

156. Денисов Ю.М. Образование и движение несжимаемой снежной лавины // Труды САНИГМИ. – 1969. – Вып. 48(63). – С. 20–31.

157. Дюнин А.К. О моделировании лавины движением сплошной среды // Труды НИИЖТ. – 1978. – Вып. 193/6. – С. 25–37.

158. Такабаев М.К., Тныштыкбаева Г.М. О динамике движения селевого потока // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1984. – С. 197–202.

159. Квасов А.И. Селевые потоки и их воздействие на сооружения. – Алма-Ата: Наука, 1987. – 131 с.

160. Яфязова Р.К. К определению уравнительного уклона // Вестник КазАТК. – Алматы, 2008. – №5 (54). – С. 10–15.

161. Степанов Б.С. Заполнение селехранилищ вязкопластическими селевыми смесями // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1989. – №11. – С. 23–27.

162. Тевзадзе В.И. Вопросы динамики связных селевых потоков и определение основных физических свойств связной селевой массы // Тезисы докладов XV Всесоюзной научно-технической конференции по противоселевым мероприятиям. Ташкент, 27–29 сентября 1978 г. – М.: ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1978. – С. 38-41.

163. Тевзадзе В.И., Кухалашвили Э.Г. Трехслойная модель движения связного (высококонцентрированного) селевого потока // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1984. – №8. – С. 29–32.

164. Рухадзе Н.В. К определению скоростей течения паводков и селевых потоков при проектировании селезащитных и селепропускных сооружений // Труды ЗакНИГМИ. – 1984. – Вып.83(90). – С. 60–66.

165. Херхеулидзе И.И. Скорости течения и русловые характеристики селевых потоков // Труды ЗакНИГМИ. – 1972. – Вып.40(46). – С. 134–182.

166. Инструкция по определению расчетных характеристик дождевых селей: ВСН 03–76. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 27 с.

167. Голубцов В.В. О расчете скорости и времени добегания стока в горном бассейне // Труды КазНИГМИ. – 1970. – Вып.36. – С. 110–126.

168. Rickenmann, D. & Koch, T. 1997. Comparison of debris flow modeling approaches. In Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment; Proceedings 1st International DFHM Conference, San Francisco, USA, 1997:576–585.

169. Suwa, H. 1989. Field observation of debris flow. Proceedings Japan-China (Taipei) Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation, Kyoto, Japan. – P. 343–353.

170. Takahashi, T. 1991. Debris Flow, JAHR Monograph Series, Balkema Publishers, the Netherlands. – 165 p.

171. Jan, C.D. and Shen, H.W. 1993. A review of debris flow analysis. Proceedings XXV JAHR Congress, Technical Session B. – Vol.III. – P. 25–32.

172. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с.

173. Гринвальд Д.И. Турбулентность русловых потоков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 166 с.

174. Срибный М.Ф. Формулы средней скорости течения рек и их гидравлическая классификация по сопротивлению движению // Исследование и комплексное использование водных ресурсов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – С. 204–221.

175. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. – М.: Наука, 1965. – Ч.1. – 639 с.

176. Лятхер В.М. Турбулентность в гидросооружениях. – М.: Энергия, 1968. – 408 с.

177. Клавен А.Б. Оценка характеристик турбулентности русловых потоков // Труды ГГИ. – 1982. – Вып.278. – С. 36–43.

178. Тер-Степанян Г.И. О критерии перехода несвязных селевых потоков в связные сели // Селевые потоки и горные русловые процессы: Сб. докл. на X Всесоюзной селевой конференции. – Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1968. – С. 339–340.

179. Мостков М.А. Гидравлические закономерности в горных потоках // Селевые потоки и меры борьбы с ними. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – С. 18–54.

180. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. – М.: Недра, 1979. – 296 с.

181. Boliang Zhao, Zhan Niu. Analysis of the vertical distribution of high sediment consentrations in the Yellow River and studies of methods of observation // IAHS Publ. – 1982. – N 137. – P. 421–430.

182. Ree T., Eyring H. // J.Appl.Phys. – 1953. – Vol.26. – P. 793–809.

183. Рабкова Е.К. Некоторые вопросы гидравлики селевых потоков: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Ташкент, 1954. – 23 с.

184. Григорян С.С. Новый закон трения и механизмы крупномасштабных горных обвалов и оползни // ДАН СССР. – 1979. – Т.244, №4. – С. 846–849.

185. Маккавеев В.М., Коновалов И.М. Гидравлика. – Л.: Речиздат, 1940. – 643 с.

186. Леви И.И. Динамика русловых потоков. – Л.; М.: Госэнергоиздат, 1957. – 242 с.

187. Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 287 с.

188. Vanoni V.A. Sediment transportation mechanics: suspension of sediment (Progress Report of Task Committee) // J. Hydr. Div. Proc. ASCE. – 1963. – Vol.89, N 5.

189. Шамов Г.И. Речные наносы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1959. – 378 с.

190. Баренблат Г.И. О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке, занимающем полупространство или плоский открытый канал конечной глубины // ППМ. – 1995. – Т.19, вып. 1. – С. 61–88.

191. Великанов М.А. Работа взвешивания наносов // Селевые потоки и меры борьбы с ними. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – С. 55–64.

192. Баренблат Г.И. О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке // ПММ. – 1953. – Т.17, вып. 3. – С. 261–274.

193. Франкль Ф.И. Опыт полуэмпирической теории движения взвешенных наносов в неравномерном потоке // Избр. труды по газовой динамике. – М.: Наука, 1973. – С. 664–669.

194. Степанов Б.С. К теории существования селевых смесей // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1988. – №10. – С. 10–31.

195. Степанов Б.С. Явление скачкообразного изменения плотности селевых потоков. Заявка на открытие // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1992. – №12. – С. 141–172.

196. Takahashi, T.A. 2009. Review of Japanese debris flow research. International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 2, N. 1.

197. Rubey, W.W. 1933. Equilibrium conditions in debris-laden streams: Am. Geophys. Union Trans., 14th Ann. Mtg. P. 497–505.

198. Knapp, R.T. 1938. Energy balance in stream flows carrying suspended load: Am. Geophys. Union Trans. P. 501–505.

199. Bagnold, R.A. 1956. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid undershear: Royal Soc. [London] Proc. A 225, 49–63.

200. Великанов М.А. Гидрология суши. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1964. – 404 с.

201. Bagnold, R.A. 1966. An approach to the sediment transport problem from general hysics. Prof. Paper 422-1, U.S. Geol. Surv.

202. Степанов Б.С. К природе грязекаменных селей // Гидрометеорология и экология. – 2013. – №2. – С. 40–60

203. Парамонов Б.А. Формирование твердой фазы селевого потока на р. Иссык 7 июля 1963 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1976. – №1. – С. 88–92.

204. Степанов Б.С. Экспериментальные исследования предельной плотности селевой массы // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1980. – №5. – С. 59–63.

205. Тевзадзе В.И., Гордезиане Д.Г., Кешелава И.К. Применение численного метода при расчете неустановившегося движения связного селевого потока по водотокам // Метеорология и гидрология. – 1982. – №5. – С. 91–97.

206. Такабаев М.К., Такабаев Т.М., Тныштыкбаева Г.М. Некоторые вопросы моделирования движения селевого потока // Деп. в ВИНИТИ 4.12.86, №8288-В 86.

207. Такабаев М.К., Такабаев Т.М. К теории расчета параметров гляциальных селей // Деп. в ВИНИТИ 26.05.88, №4170-В 88.

208. Мосолов П.П., Мясников В.П. Вариационные методы в теории течений вязкопластической среды // ППМ. – 1965. – Т.29, вып. 3. – С. 468–492.

209. Запорожченко Э.В. Необычный сель на р. Куллумколсу // Метеорология и гидрология. – 1985. – №12. – С. 102–108.

210. Громов В.А., Кайнер В.Д. Опыт определения максимального селевого выброса в бассейне р. Куллумколсу (КБ АССР) // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1984. – С. 209–215.

211. Кайнер В.Д., Громов В.А. Инженерно-геологические особенности селеформирования в бассейне р. Куллумколсу (КБ АССР) // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1984. – С. 202–209.

212. Яглом И.М. Математика и реальный мир. – М.: Знание, 1978. – 63 с.

213. Яглом И.М. Математические структуры и математическое моделирование. – М.: Советское радио, 1980. – 145 с.

214. Степанов Б.С. Транспортно-сдвиговый и сдвигово-эрозионный селевые процессы // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1985. – №9. – С. 3–16.

215. Степанов Б.С. К вопросу о модели эрозионно-сдвигового процесса // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1980. – №4. – С. 31–36.

216. Деговец А.С., Козьминых Э.Р. Некоторые результаты исследований сквозного селеуловителя на реке Акжар и глухих плотин на реках Малая и Большая Алматинки // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1984. – С. 45–56.

217. Противоселевая защита в Казахской ССР. – Алма-Ата, 1980. – 16 с.

218. Противоселевая защита в Казахстане. – Алма-Ата, 1990. – 31 с.

219. Великанов М.А. Гидрология суши. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1948. – 530 с.

220. Об исследовании следов селевого потока 15 июля 1973 г. в бассейне р. Малая Алматинка: Технический отчет / КазНИГМИ. – Алма-Ата, 1974. – 49 с. – Научный руководитель Ю.Б. Виноградов (архив Казгидромета).

221. Квасов А.И. Некоторые результаты изучения взаимодействия модели сооружения со смесью, имитирующей селевой поток // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1981. – С. 61–73.

222. Гавришина Л.Н. Методика определения статического напряжения сдвига вязкопластичных селевых смесей // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1985. – №9. – С. 105–113.

223. Егиазаров И.В. Общее уравнение предельной транспортирующей способности потока для несвязных наносов // Доклады АН СССР. – М., 1956 – Т.107, №4. – С. 525–528.

224. Степанов Б.С. О балансе твердой и жидкой фаз селей Заилийского Алатау // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1976. – №1. – С. 153–157.

225. Херхеулидзе Г.И. О концепции предельного насыщения и методах расчета основных характеристик селевых потоков // XVI Всесоюзная научно-техническая конференция по методам расчета и прогноза селевых потоков. – М.: Гидрометеоиздат, 1981. – С.44–53.

226. Изобретатель и рационализатор. – I980. – №2.

227. Гагошидзе М.С. Гидравлический способ борьбы с селевыми (грязекаменными) потоками // Гидротехника и мелиорация. – 1958. – №9 – С. 17–27.

228. Байнатов Ж.Б. Защитные сооружения горных автомобильных дорог от селевых потоков: Автореф. дис. … докт. техн. наук. – М., 1993. – 48 с.

229. А.с. 1309634 СССР, М.Кл. Е 02 В 3/00. Селезащитное сооружение /Б.С. Степанов и Т.С. Степанова (СССР)/. – №3928607/29-15; Заявлено 05.07.85; Опубл. 23.05.88; Бюл. №19.

230. А.с. 1506962 СССР. Селезащитное сооружение /Б.С. Степанов (СССР)/. – №4418124 /23-15; Заявлено 31.03.88.

231. Пашкевич М.Ю., Березинский Н.А. Возможности авиационной технологии ограничения осадков для предупреждения негативных склоновых явлений // Труды Всероссийской конференции по селям 26–28 октября 2005 г. / Под ред. М.Ч. Залиханова. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – С. 351–358.

232. Непорожний П.С. Защита гидроэлектростанций от селевых потоков. – М.: Госэнергоиздат, 1947. – 167 с.

233. Рустамов С.Г. Селевые потоки в Азербайджане // Труды ИГАН АзССР. – 1957. – №7.

234. Смирнов И.П., Деговец А.С. Оценка степени селеносности бассейнов рек при практических расчетах максимального селевого стока // Вестник АН КазССР. – 1970. – №3. – С. 42–47.

235. Деговец А.С., Токмагамбетов Г.А. Оценка степени селеопасности бассейнов рек Заилийского Алатау // Вестник АН КазССР. – 1986. – №11. – С. 51–63.

236. Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Климат голоцена и селевая активность на северном склоне Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2002. – №1. – С. 74–81.

237. Степанов Б.С. Основные закономерности формирования, движения и остановки селей: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. – Алматы, 1999. – 48 с.

238. Калмынкина Е.М., Горбунов А.П. Причины возникновения и рельефообразующая роль Иссыкского селя // Известия АН СССР. Серия географическая. – 1967. – №4 – С. 53–58.

239. Лосев К.С. Климат: вчера, сегодня … и завтра? – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 175 с.

240. Климанов В.А. Продолжительность безморозного периода в оптимум голоцена (около 5500 л.н.) на территории Северной Евразии // Известия АН СССР. Серия географическая. – М.: Наука, 2006. – №1. – С. 61–67.

241. Голубович В.А. Некоторые результаты использования сейсморасходомера ИРС-1 // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1988. – №10. – С. 99–103.

242. Осипова Н.А., Казанников С.М. Оценка объемов выноса рыхлообломочного материала из бассейна р. Кумбельсу селем 1977 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1982. – № 6. – С. 81–83.

243. Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. Т.13. Центральный и Южный Казахстан. Вып.2. Бассейн озера Балхаш. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980.

244. Горбунов А.П. Гляциальные сели и пути их прогноза // Труды КазНИГМИ. – 1971. – Вып.51. – С. 45–56.

245. Мочалов В.П., Степанов Б.С. Способы контролируемого опорожнения высокогорных селеопасных озер // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1984. – №8. – С. 108–117.

246. Дуйсенов Е.Д. О профилактических мероприятиях по борьбе с селями в районе ледника Туюксу // Труды КазНИГМИ. – М.: Гидрометеоиздат, 1969. – Вып. 33. – С. 83–87.

247. Степанов Б.С., Хайдаров А.Х., Яфязова Р.К. Некоторые уроки превентивных опорожнений гляциальных озер Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2001. – №3–4. – С. 107–118.

248. О научно-исследовательских, экспериментальных и полевых работах с целью ликвидации селевой угрозы в бассейне р. М. Алматинки: Технический отчет / КазНИИМОСК. – Алматы, 1997. – 90 с. Ответственный исполнитель Б.С. Степанов (архив Казгидромета).

249. Селезащитные барьеры (техническая документация Geobrugg). – Август 2008. – 16 с.

250. Караманов У.К., Деговец А.С. Внимание: сель! – Алма-Ата: Кайнар, 1992. – 47 с.

251. Сейнова И.Б., Золотарев Е.А. Ледники и сели Приэльбрусья: (Эволюция оледенения и селевой активности). – М.: Научный мир, 2001. – 204 с.

252. Укрощение селей. – Алма-Ата: Казахстан, 1983. – 31 с.

253. Байнатов Ж.Б. Конструкции селезащитных сооружений и методы их расчета. – Алма-Ата: КазНИИНТИ, 1991. – 159 с.

254. Кавецкий С.П. Обоснование проекта организации службы предупреждений г. Алматы об угрозе селей // Труды КазНИГМИ. Вып.4. Вопросы селей и гидрологических прогнозов. – М.: Гидрометеоиздат, 1953. – С. 55–73.

255. Марков И.Н., Меньшов В.А. Селевой поток в бассейне р. Кумбель 26 июля 1981 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1984. – №8. – С. 139–143.

256. Коваленко П.И., Красюков В.А., Новиков М.Я. Результаты испытаний сейсмической системы оповещения о селевой опасности // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1978. – №3. – С. 92–96.

257. Красюков В.А. Сейсмические системы оповещения о селевой опасности // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1980. – №5. – С. 95–100.

258. Вайсер В.В., Красюков В.А., Голубович В.А. Локальная система передачи параметров селя // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоиздат, 1984. – №8. – С. 132–135.

259. Халиков Д.К. Разработка логистической системы оповещения при угрозе и возникновении селевого потока: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Алматы, 2008. – 17 с.

260. Херхеулидзе И.И. Сквозные защитные и регулирующие сооружения на горных реках. – М., 1967. – 131с.

261. Херхеулидзе Г.И. Селевые нагрузки и способы их определения // Труды ЗакНИГМИ, 1984. – Вып.83(90). – С. 77–112.

262. Долгих С.А., Смирнова Е.Ю., Сабитаева А.У. К вопросу о построении сценариев изменения климата Казахстана // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2006. – №1. – С. 7–19.

263. Вилесов Е.Н. Эволюция внутриконтинентальной ледниковой системы в XX веке (на примере северного склона Заилийского Алатау): Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. – Алматы, 1997. – 47 с.

264. Яфязова Р.К. Глобальное потепление климата и селевая активность. Проблемы адаптации // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2001. – №3–4. – С. 97–106.

265. Yafyazova R.K. 2003. Influence of climate change on mudflow activity on the northern slope of the Zailiysky Alatau Mountains, Kazakhstan. Proceedings of the Third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, September 10–12, 2003 Davos, Switzerland. P. 199–204.

266. Яфязова Р.К. Влияние климата на селеформирующие факторы // Гидрометеорология и экология. – 1997. – №3. – С. 209–216.

267. Яфязова Р.К. Селевая активность в Заилийском Алатау в прошлом, настоящем и будущем // Географические основы устойчивого развития Республики Казахстан. – Алматы, 1998. – С. 511–515.

268. Яфязова Р.К. Новый способ оценки селевой активности (на примере северного склона Заилийского Алатау) // Новые подходы и методы в изучении природных и природно-хозяйственных систем. – Алматы, 2000. – С. 220–223.

269. Yafyazova, R.K. 2005. Estimation of mudflow activity under the changing climate. Journal of Nepal Geological Society, Vol. 32, (Special Issue). Abstracts of the Fifth Asian Regional Conference on Engineering Geology for Major Infrastructure Development and Natural Hazards Mitigation, September 28-30, 2005, Kathmandu, Nepal. P. 78.

270. Шиварева С.П., Долгих С.А., Степанов Б.С., Яфязова Р.К. и др. Влияние изменения климата на водные ресурсы бассейнов озера Балхаш и Аральского моря // Гидрометеорология и экология. – 2009. – №3. – С. 36–61.

271. Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Разработка и реализация современной стратегии защиты от селей – актуальная проблема обеспечения устойчивого развития Казахстана // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2004. – №3. – С. 112–119.

272. Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Концепция защиты от селей Алматы в условиях изменяющегося климата // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2006. – №1. – С. 67–79.

273. Медеу А. Научные основы управления селевыми процессами сейсмоактивных горных геосистем Казахстана: Автореф. дис. … докт. геогр. наук. – Алматы, 1994. – 43 с.

274. Медеу А.Р., Нурланов М.Т., Заппаров М.Р., Есжанова А.С. Проблемы оптимизации селезащитных мероприятий в Казахстане // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 1999. – №4. – С. 24–40.

275. Котляков В.М., Лориус К. Глобальные изменения за последний ледниково-межледниковый цикл // Известия АН СССР. Серия географическая. – 1992. – №1. – С. 5–22.

276. Котляков В.М., Николаев В.И., Барков Н.И., Николаев С.Д. Эволюция термических условий центральной Антарктиды за 150 тысяч лет по изотопно-кислородным исследованиям керна со станции Восток // Материалы гляциологических исследований. – М., 1987. – Вып.59. – С. 30–37.

277. Корольков Н.М. Закавказская дорога // Труды совещания «Защита железных дорог от селевых потоков». – М.: Тбилиси, 1962. – С. 5–26.

278. Степанов Б.С., Хайдаров А.Х., Яфязова Р.К. О катастрофических явлениях в голоцене в бассейне реки Большая Алматинка // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 1996. – №4. – С. 154–165.

279. Каталог ледников СССР. Т.13. Центральный и Южный Казахстан. Вып.2. Бассейн оз. Балхаш. Ч.1. Бассейны левых притоков р. Или от устья р. Курты до устья р. Тургень. – Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 79 с.

280. Олиферов А.Н. Значение борьбы с эрозией для сокращения селевого стока в горных районах УССР // Республиканская межвузовская конференция по проблеме «Эрозия почв и борьба с нею» (27–30 ноября 1964 г.). – Одесса, 1964. – С. 48–49.

281. Кочерга Ф.К. Горномелиоративные работы в Средней Азии и Южном Казахстане. – М.: Лесная промышленность, 1965. – 400 с.

282. Айзенберг М.М. О роли леса и эрозии почв в селеобразовании в горных районах Украины // Материалы совещания по борьбе с эрозией почв и селевыми потоками: Тезисы докладов. – Ташкент, 1960. – С. 130–135.

283. Телешек Ю.К. Эрозионные процессы в горных районах Украинской ССР и меры борьбы с ними // Материалы совещания по борьбе с эрозией почв и селевыми потоками. – Ташкент, 1960. – С. 112–119.

284. Олиферов А.Н. Крымские сели и способы борьбы с ними // Материалы IV Всесоюзной конференции по селевым потокам. – Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1959. – С. 52–58.

285. Махатадзе Л.Б. О растительном покрове и его восстановлении в районах образования селей на южных склонах Большого Кавказа // Селевые потоки и меры борьбы с ними. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – С. 228–239.

286. Литовченко А.Ф. Катастрофический селевой паводок на р. Иссык // Метеорология и гидрология. – М., 1964. – №4. – С. 39–42.

287. Штепа Б.Г. Основные проблемы защиты территории СССР от селевых потоков // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1979. – С. 7–22.

288. Флейшман С.М, Иванов В.Н., Хегай А.Ю. Насущные задачи селевой науки и практики // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1981. – С. 3–18.

289. Хегай А.Ю., Попов Н.В. Перспективы и проблемы инженерной защиты от селей в Казахстане // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1988.

290. Попов Н.В. Опыт разработки и реализации комплексных и специальных схем инженерной защиты территорий от опасных геологических процессов в Казахстане // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата, 1990. – С. 18–24.

291. СНиП 2.01.15-90 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения проектирования. – М.: Госстрой СССР, 1991. – 32 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора ... 5

ПРЕДИСЛОВИЕ ... 7

Ч а с т ь I. **СЕЛЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ** ... 11

Глава 1. ПРИРОДА СЕЛЕЙ ... 12
1.1. Генезис селей ... 14
1.1.1. Сели дождевого генезиса ... 15
1.1.2. Гляциальные сели ... 20
1.1.3. Водоснежные сели ... 22
1.1.4. Водоледяные сели ... 25
1.1.5. Оползни, трансформирующиеся в сели ... 32
1.1.5.1. Оползни, образующиеся в результате антропогенного обводнения ... 33
1.1.5.2. Мутьевые потоки ... 34
1.1.6. Сели сейсмического генезиса ... 34
1.1.7. Сели антропогенного генезиса ... 36

Глава 2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ СЕЛЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕЛЕВЫХ БАССЕЙНАХ ... 38
2.1. Зона селеобразования ... 39
2.2. Промежуточная зона ... 46
2.3. Зона разгрузки ... 51
2.4. Взаимодействие факторов селеформирования ... 71

Глава 3. СЕЛЕВАЯ МАССА ... 75
3.1. Состав селевой массы ... 77
3.1.1. Газовый компонент ... 77
3.1.2. Жидкий компонент ... 78
3.1.3. Твердый компонент ... 79
3.2. Свойства и характеристики селевой массы ... 82
3.2.1. Упругость селевой массы ... 82
3.2.2. Вязкость селевой массы ... 82
3.2.3. Пластичность селевой массы ... 86
3.2.4. Предельная плотность селевой массы ... 93
3.2.5. Распад селевой массы ... 96

Глава 4. МЕХАНИЗМЫ СЕЛЕФОРМИРОВАНИЯ ... 102
4.1. Критические условия зарождения и существования селей ... 105
4.2. Транспортный селевой процесс ... 107
4.2.1. Примеры селепроявлений ... 111
4.3. Эрозионно-сдвиговый селевой процесс ... 112
4.4. Критические условия возникновения селей ... 112
4.4.1. Модели селеобразования ... 116
4.4.2. Примеры селепроявлений ... 120
4.5. Сдвиговый селевой процесс ... 123
4.5.1. Склоны, сложенные рыхлообломочными породами ... 123
4.5.2. Ложбины в коренных породах ... 128
4.5.3. Уступы морен ... 131
4.5.4. Ложбины на задернованных и залесенных склонах ... 133
4.6. Постселевые явления ... 135

Глава 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЛЕЙ.....138
5.1. Физическое моделирование селевых процессов……..... 140
5.1.1. Эксперименты КазНИГМИ в 1951–1955 гг. 141
5.1.2. Эксперименты Г. В. Иванова..... 142
5.1.3. Исследования Г. М. Беручашвили.....144
5.1.4. Исследования КазНИГМИ. Селевой очаг в бассейне руч. Кокчека.....146
5.1.5. Эксперименты КазНИГМИ в верховьях р. Шамалган..... 151
5.2. Моделирование селей в лабораторных условиях..... 165
5.2.1. Исследования ГрузНИИГиМ..... 165
5.2.2. Исследования Геологической службы США..... 166
5.3. Моделирование заполнения селехранилищ вязкопластичной селевой массой..... 167
5.4. Моделирование формирования конуса выноса..... 169
5.5. Математическое моделирование селевых процессов. «Гидравлические» модели трансформации селей..... 172
5.5.1. Модель М. К. Такабаева и Г. М. Тныштыкбаевой..... 173
5.5.2. Модель А. И. Квасова..... 174
5.5.3. Модель Ю. Б. Виноградова..... 174
5.5.4. Модель Б. С. Степанова и И. Г. Цукермана.....175
5.5.5. Модель заполнения селехранилищ..... 178

Глава 6. ОСНОВНЫЕ КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЕЛЕВОГО ПОТОКА.....182
6.1. Кинематические характеристики селевого потока.....182
6.2. Энергетические характеристики селевого потока.....193

Глава 7. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СУЩЕСТВОВАНИЯ СЕЛЕВОЙ МАССЫ.....201
7.1. Постановка задачи..... 202
7.2. Природа процессов перемещения твердых частиц в составе селевого потока.....206
7.2.1. Перенос частиц в квазивзвешенном состоянии, обусловленном проявлением вязкопластических свойств селевой массы.....206
7.2.2. Роль кулоновского трения в процессе движения селевой массы.....209
7.2.3. Перенос частиц во взвешенном состоянии, обусловленный процессами перемешивания в движущейся селевой массе..... 214
7.3. Модель состояния селевой массы.....218
7.3.1. Аксиоматическое доказательство отрицательного наклона у кривой равновесных состояний для вязкопластичной селевой массы.....219
7.3.2. Математические модели состояния селевой массы в отсутствие свойства пластичности.....221
7.4. Экспериментальное определение параметров функции равновесных состояний.....235

Глава 8. ТРАНСФОРМАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЕВЫХ ПОТОКОВ.....242
8.1. Краткая ретроспектива.....242
8.2. Модель трансформации селя.....247
8.2.1. Аксиомы формирования селя..... 249
8.2.2. Аксиомы существования селевой массы..... 249
8.2.3. Аксиома распада селевой массы.....250
8.2.4. Модель набора рыхлообломочных пород.....253
8.2.5. Модель распада селевой массы..... 258

8.3. К определению уравнительного уклона селевых отложений в селехранилищах ... 260
8.4. Искусственное увеличение предельного напряжения сдвига селевой массы ... 266
8.5. Искусственное уменьшение предельного напряжения сдвига селевой массы ... 267
8.6. Комбинированная селезадерживающая плотина ... 268

Часть II. **СЕЛЕТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ И ПРОТИВОСЕЛЕВЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ** ... 271

Глава 9. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ СЕЛЕВОЙ ОПАСНОСТИ ... 272

Глава 10. ПРЕВЕНТИВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ... 287
10.1. Мероприятия, обеспечивающие минимизацию потерь от селей ... 287
10.2. Метод предотвращения селей дождевого генезиса ... 288
10.3. Методы предотвращения зарождения озер моренно-ледниковых комплексов ... 291
10.4. Методы превентивного опорожнения озер моренно-ледниковых комплексов ... 299
10.4.1. Метод опорожнения селеопасного озера с использованием взрывчатых веществ ... 301
10.4.2. Метод опорожнения селеопасного озера с использованием бульдозера и сифонов ... 301
10.4.3. Механико-гидравлический метод опорожнения селеопасного озера ... 303
10.4.4. Гидравлический метод опорожнения селеопасного озера ... 303
10.5. Опыт превентивного опорожнения селеопасных моренных озер ... 311
10.6. Оценка селевого риска и целесообразности превентивных работ по опорожнению поверхностных водоемов ... 326

Глава 11. СЕЛЕТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ ... 328
11.1. Краткий анализ эффективности противоселевых мероприятий на северном склоне Иле Алатау ... 350

Глава 12. СИСТЕМЫ ОПОВЕЩЕНИЯ О СЕЛЕВОЙ ОПАСНОСТИ В КАЗАХСТАНЕ (история, современное состояние и перспективы) ... 355

Глава 13. СТРАТЕГИЯ ЗАЩИТЫ ОТ СЕЛЕЙ В XXI ВЕКЕ ... 367
13.1. Защита от селей в условиях увеличения селевой активности ... 367
13.2. Концепция защиты г. Алматы ... 387
13.3. Концепция защиты районных центров и крупных населенных пунктов ... 396
13.4. Необходимость модернизации нормативных документов ... 407

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ... 413

ЛИТЕРАТУРА ... 416

CONTENTS

Preface....5
INTRODUCTION....7
P a r t I. **DEBRIS-FLOW PROCESSES**....11
Chapter 1. NATURE OF DEBRIS FLOWS....12
1.1. Initiation of debris flows....14
1.1.1. Rainfall-induced debris flows....15
1.1.2. Debris flows induced by glacier breakout floods....20
1.1.3. Slush flows....22
1.1.4. Water-ice flows....25
1.1.5. Landslide-induced debris flows....32
1.1.5.1. Landslides induced by human activity....33
1.1.5.2. Turbidity currents....34
1.1.6. Debris flows induced by earthquake....34
1.1.7. Debris flows induced by human activity....36
Chapter 2. REGULARITIES OF THE INFLUENCE OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS ON THE DEVELOPMENT OF DEBRIS-FLOW PROCESSES IN DEBRIS-FLOW BASINS....38
2.1. Initiation zone....39
2.2. Transit zone....46
2.3. Deposit zone....51
2.4. Debris flow formation factor interaction....71
Chapter 3. DEBRIS-FLOW MASS....75
3.1. Debris-flow mass composition....77
3.1.1. Gas component....77
3.1.2. Liquid component....78
3.1.3. Solid component....79
3.2. Properties and characteristics of debris-flow mass....82
3.2.1. Elasticity....82
3.2.2. Viscosity....82
3.2.3. Plasticity....86
3.2.4. Density limit....93
3.2.5. Decomposition....96
Chapter 4. MECHANISMS OF FORMING DEBRIS FLOWS....102
4.1. Critical conditions of initiation and development of debris flows....105
4.2. Transport debris-flow process....107
4.2.1. Examples of debris flow events....111
4.3. Erosive and shearing debris-flow process....112
4.4. Critical conditions for initiation of debris flows....112
4.4.1. Models for debris flow forming....116
4.4.2. Examples of debris flow events....120
4.5. Shearing debris-flow process....123
4.5.1. Slopes composed of loose rocks....123
4.5.2. Gullies in bedrocks....128
4.5.3. Rims....131
4.5.4. Gullies into the matted and forest-covered slopes....133
4.6. Post debris-flow phenomenan....135
Chapter 5. SIMULATION OF DEBRIS FLOWS....138
5.1. Physical simulation of debris-flow processes....140
5.1.1. KazNIGMI experiments in 1951–1955....141
5.1.2. Ivanov's experiments....142
5.1.3. Beruchashvili's experiments....144

5.1.4. KazNIGMI experiments. Debris-flow initiation zone in the Kokcheka Brook basin ... 146
5.1.5. KazNIGMI experiments in the Upper Chemolgan River ... 151
5.2. Simulation of debris flows in a laboratory environment ... 165
5.2.1. GruzNIIGiM experiments ... 165
5.2.2. USGS experiments ... 166
5.3. Simulation of filling reservoirs with viscoplastic debris-flow mass ... 167
5.4. Simulation of forming a fan ... 169
5.5. Mathematical simulation of debris-flow processes. Hydraulic models for transformation of debris flows ... 172
5.5.1. Takabaev & Tnyshtykbaeva's model ... 173
5.5.2. Kvasov's model ... 174
5.5.3. Vinogradov's model ... 174
5.5.4. Stepanov & Tsukerman's model ... 175
5.5.5. Model for filling reservoir ... 178

Chapter 6. MAIN KINEMATIC AND ENERGY REGULARITIES OF DEBRIS FLOW ... 182
6.1. Kinematic characteristic of debris flows ... 182
6.2. Energy characteristic of debris flows ... 193

Chapter 7. THEORY FOR STATE OF DEBRIS-FLOW MASS ... 201
7.1. Problem statement ... 202
7.2. Nature of particle transport processes in debris flows ... 206
7.2.1. Particle transport in quasi-suspension due to viscoplasticity of debris-flow mass ... 206
7.2.2. Coulomb friction's role in the motion process of debris-flow mass ... 209
7.2.3. Particle transport in suspension due to mixing debris-flow mass ... 214
7.3. Model for state of debris-flow mass ... 218
7.3.1. Axiomatic proof of negative slope of equilibrium states line for viscoplastic debris-flow mass ... 219
7.3.2. Mathematical models for state of debris-flow mass in the absence of plasticity ... 221
7.4. Experimental determination of parameters of function of stabilities ... 235

Chapter 8. TRANSFORMATION OF CHARACTERISTICS OF DEBRIS FLOWS ... 242
8.1. The capsule retrospective review ... 242
8.2. Model for transformation of debris flows ... 247
8.2.1. Axioms of formation of debris flows ... 249
8.2.2. Axioms of characteristic constancy criteria of debris-flow mass ... 249
8.2.3. Axiom of decomposition of debris-flow mass ... 250
8.2.4. Model for enrichment of loose rock ... 253
8.2.5. Model for decomposition of debris-flow mass ... 258
8.3. On the determination of slope of surface of debris-flow deposits in reservoirs ... 260
8.4. Artificial increase of shear stress of debris-flow mass (N/m^2) ... 266
8.5. Artificial decrease of shear stress of debris-flow mass (N/m^2) ... 267
8.6. Composite dam for debris flow control ... 268

P a r t II. **COUNTERMEASURES AGAINST DEBRIS-FLOW HAZARDS** ... 271

Chapter 9. ASSESSMENT OF DEBRIS-FLOW HAZARDS ... 272

Chapter 10. PREVENTIVE MEASURES ... 287
10.1. Measures for minimization of damage from debris flows ... 287
10.2. Method for prevention of rainfall-induced debris flows ... 288
10.3. Methods for prevention of initiation of lakes on the moraine-glacial complexes ... 291
10.4. Methods for preventive emptying of lakes on the moraine-glacial complexes… ... 299

10.4.1. Method for emptying of debris-flow hazardous lake by explosives....301
10.4.2. Method for emptying of debris-flow hazardous lake by bulldozer and siphon....301
10.4.3. Mechanical-hydraulic method for emptying of debris-flow hazardous lake....303
10.4.4. Hydraulic method for emptying of debris-flow hazardous lake....303
10.5. Experience of preventive emptying of moraine lakes....311
10.6. Assessment of debris-flow hazards and appropriateness of preventative measures for emptying of moraine lakes....326
Chapter 11. DEBRIS FLOW CONTROL BY DAMS AND OTHER FACILITIES....328
11.1. Summary analysis of the effectiveness of measures for defense against debris flows on the northern slope of the Zailiysky Alatau....350
Chapter 12. DEBRIS-FLOW HAZARDS WARNING SYSTEMS IN KAZAKHSTAN (history, current status and prospects)....355
Chapter 13. DEFENSE STRATEGY AGAINST DEBRIS FLOWS IN THE 21st CENTURY....367
13.1. Defense against debris flows under increasing debris-flow activity....367
13.2. The concept for defense against debris flows of Almaty city....387
13.3. The concept for defense against debris flows of other settlements....396
13.4. Need for improvement of normative documents....407
CONCLUSION....413
REFERENCES....416

Научное издание

СЕЛЕВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

Том 3

Борис Сергеевич Степанов
Роза Кайюмовна Яфязова

СЕЛЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ
И СЕЛЕТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Редактор *Т. Н. Кривобокова*
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 11.07.2014.
Формат 70x100$^{1}/_{16}$. Бумага офсетная. Печать офсет.
27,2 п. л. Тираж 500.

Борис Сергеевич Степанов – геофизик, кандидат технических наук, доктор географических наук, профессор. В 1961 г. окончил Казахский политехнический институт. С 1961 по 1974 г. – начальник бюро СКБ завода «Казгеофизприбор», где по заказу Казахского научно-исследовательского гидрометеорологического института (КазНИГМИ) под руководством Б. С. Степанова были разработаны приборы для бесконтактного измерения характеристик селей для Шамалганских экспериментов по воспроизведению искусственных селей. С 1974 по 2000 г. заведовал селеметрической лабораторией отдела селевых потоков КазНИГМИ (с 1995 г. переименован в КазНИИМОСК), в которой был выполнен большой комплекс экспериментальных и теоретических исследований в области селей. Им открыто и объяснено явление скачкообразного изменения плотности селевой массы – ключевого элемента теории трансформации характеристик селей. Автор более 140 научных публикаций, в том числе 19 авторских свидетельств на изобретения СССР, 4 монографий и Карты селевой опасности территории Республики Казахстан.

Роза Кайюмовна Яфязова – гидролог, доктор технических наук. Окончив в 1987 г. Казахский государственный университет, на протяжении более 25 лет работала в научных подразделениях гидрометеорологической службы Казахстана. Научные интересы связаны с рельефообразующей ролью селей и оценкой селевой активности в различных климатических условиях. Разработанный ею геолого-геоморфологический метод определения генезиса конусов выноса в совокупности с данными об изменении климата позволил ей не только оценить селевую активность в прошлом и в настоящее время, но и предсказать многократное возрастание селевой активности при увеличении температуры воздуха на 2–3 ºС в горных районах средних широт, несущих оледенение. Автор более 80 научных публикаций, в том числе 2 монографий и Карты селевой опасности территории Республики Казахстан.