

Р.К. ЯФЯЗОВА

ПРИРОДА СЕЛЕЙ ЗАИЛИЙСКОГО АЛАТАУ ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ



МИНИСТЕРСТВО ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«КАЗГИДРОМЕТ»

Р.К. ЯФЯЗОВА

**ПРИРОДА СЕЛЕЙ ЗАИЛИЙСКОГО АЛАТАУ
ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ**

АЛМАТЫ 2007

УДК 551.311(574)
ББК 26.222.5
Я89

Утверждено к печати Научной секцией по гидрометеорологии и экологии Технического Совета РГП «Казгидромет» Министерства охраны окружающей среды Республики Казахстан

Яфязова Р.К.

Я89 Природа селей Заилийского Алатау. Проблемы адаптации. – Алматы, 2007. – 158 с.

ISBN 9965-32-043-8

Рецензенты: доктор географических наук, профессор *Б.С. Степанов*
доктор географических наук, профессор *Е.Н. Вилесов*

Дано систематизированное описание природы селей Заилийского Алатау. Оценена селевая активность хребта. Рассмотрены основные факторы, влияющие на селевую активность. Приведена антология катастрофических селей. Описаны проекты противоселевых мероприятий для г. Алматы, концепция которых изменялась по мере развития представлений о природе селевых явлений. Дана оценка защищенности от селей населенных пунктов, расположенных в предгорной зоне северного склона Заилийского Алатау, а также изложены основные положения предлагаемой концепции защиты от селей в условиях глобального потепления.

Монография может быть полезна для специалистов в области селеведения, географии, гидрологии, проектирования селезащитных сооружений, а также использована аспирантами и студентами гидрологических и гидротехнических специальностей.

R.K. Yafyazova in the book «Nature of Debris Flows in the Zailiysky Alatau Mountains. Problems of Adaptation» gives systematized description of nature of debris flows in the Zailiysky Alatau Mountain Range, estimates debris-flow activity of the mountain range and considers the main factors affecting debris-flow activity. Author presents the anthology of catastrophic debris flows and analyses the plans for debris-flow-protection measures for Almaty city proposed in the 20th century. R.K. Yafyazova assesses the current defense against debris flows for the settlements located on the foothill plain of the northern slope of the Zailiysky Alatau and states the main ideas of the proposed concept of defense against debris flows under the global climate warming.

The book is addressed to debris flow experts, geographers, hydrologists, designers. It can also be useful for students of hydrological and hydroengineering specialties as a helpful source of information in addition to existing guide books.

Я $\frac{1805040700}{00(05) - 07}$

ББК 26.222.5

ISBN 9965-32-043-8

© Яфязова Р.К., 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Природа селей	8
1.1. Генезис селей Заилийского Алатау	12
1.1.1. Сели дождевого генезиса	12
1.1.2. Сели гляциального генезиса	16
1.1.3. Сели водоледового генезиса	17
1.1.4. Водоснежные сели	20
1.1.5. Сели сейсмического генезиса	22
1.1.6. Сели антропогенного генезиса	24
1.2. Механизмы селеформирования	27
1.3. Условия существования селей	33
1.4. Распространение селей	38
Глава 2. Селевой бассейн и его составные части	41
2.1. Стартовая зона	42
2.2. Промежуточная зона	47
2.3. Зона разгрузки	52
Глава 3. Факторы селеформирования	60
3.1. Климатический фактор	60
3.2. Метеорологический фактор	63
3.3. Гидрологический и гидрогеологический факторы	70
3.4. Гляциологический фактор	72
3.5. Геологический фактор	76
3.5.1. Состав и свойства пород в селевых бассейнах	79

3.6. Геоморфологический фактор	82
3.7. Почвенно-растительный фактор	85
3.8. Антропогенный фактор	87
3.9. Взаимодействие факторов селеформирования	91
Глава 4. Катастрофические сели северного склона	
Заилийского Алатау	97
4.1. Катастрофический сель конца плейстоцена в бассейне р. Большая Алматинка	97
4.2. Сель 1841 года	98
4.3. Сели (оползни-потоки) 8 июня (28 мая) 1887 года	99
4.4. Сель 8 июля 1921 года	100
4.5. Сель 16 мая 1947 года	106
4.6. Сель 8 июля 1950 года	106
4.7. Сель 7 июля 1963 года	108
4.8. Сель 15 июля 1973 года	110
4.9. Сели 3–4 августа 1977 года	114
4.10. Сель 28–29 января 1988 года	116
4.11. Сель 5 января 2006 года	117
Глава 5. Проблемы адаптации	121
5.1. Проблемы оценки селевой активности на северном склоне Заилийского Алатау	122
5.2. Противоселевые защитные сооружения	127
5.3. Превентивные противоселевые мероприятия	132
Заключение	137
Глоссарий	139
Литература	145

ВВЕДЕНИЕ

Освоение горных и предгорных территорий связано с опасностью, вызываемой как катастрофическими стихийными явлениями, так и антропогенным воздействием на природные процессы. Землетрясения, сели, оползни, обвалы, лавины, паводки – далеко не полный перечень природных явлений, приводящих к гибели людей и приносящих большой материальный ущерб.

Заилийский Алатау считается регионом наибольшей селевой опасности в СНГ. С целью уменьшения угрозы, наносимой селями, в большинстве бассейнов рек северного склона Заилийского Алатау возведены селезащитные сооружения. Комплекс инженерных сооружений, возведенных Казселезащитой с целью снижения ущерба, который может быть нанесен селями г. Алматы, экспертами ООН оценивается примерно в 200 млн. долларов [4]. Целесообразность сооружения плотин очевидна, однако степень их эффективности оценивается неоднозначно. Так, при сооружении плотины в Медеу предполагалось, что она будет служить 10 000 лет [4]. Строительство плотины еще не было завершено, а емкость селехранилища на 2/3 заполнилась грязекаменной массой селя 1973 г. Потребовалось экстренное сооружение второй очереди плотины, поскольку г. Алматы остался без защиты [146].

Результаты изучения условий формирования конусов выноса основных рек северного склона Заилийского Алатау показали, что емкость большинства селехранилищ значительно меньше, чем это необходимо для надежной защиты даже в условиях климата 20 века. При глобальном потеплении климата селевая активность возрастет, поэтому защита только с помощью плотин станет не только неэффективной, но и опасной. Заполненные селехранилища могут стать, в случае их разрушения, очагами селеформирования. Основной частью комплекса селезащитных мероприятий должны стать превентивные мероприятия: опорожнение селеопасных озер и мелиорация стартовых зон селей дождевого генезиса. Однако, по данным [4], затраты, направленные на проведение превентивных работ на озерах за прошедшие 35 лет, не превышают 5 % от об-

щей стоимости крупных селезащитных комплексов, возведенных в различных районах Северного Тянь-Шаня. Мелиорация стартовых зон селей дождевого генезиса в настоящее время даже не планируется.

Ущерб, вызываемый селями, может быть значительно снижен при научно обоснованной оценке селевой опасности осваиваемых территорий, эффективном комплексировании селезащитных мероприятий, своевременном оповещении о селевой опасности. Главной причиной недооценки селевой опасности в 60–70 годах 20 века был относительно низкий уровень знаний о природе селей, а также влиянии климата на селевую активность в горах, несущих оледенение. Неверными были и представления о механизмах зарождения селей дождевого генезиса, трансформации их характеристик по мере движения на конусах выноса и в селехранилищах.

Большой вклад в развитие селеведения в 70–90 годы прошлого столетия внесли результаты исследований, выполненных в Казахском научно-исследовательском институте экологии и климата (КазНИИЭК), в прошлом – Казахский научно-исследовательский гидрометеорологический институт (КазНИГМИ), Казахский научно-исследовательский институт Госкомгидромета СССР (КазНИИ Госкомгидромета СССР), Казахский научно-исследовательский институт мониторинга окружающей среды и климата (КазНИИМОСК). Мониторинг селевой деятельности на территории Казахстана осуществлялся Комплексной гидрографической партией Казгидромета. В ее задачи, в частности, входило определение важнейших характеристик прошедших селей. Эта информация использовалась при планировании и проведении селезащитных мероприятий. В 90-х годах 20 века эти работы были приостановлены. В последние годы мониторинг селевых явлений возобновился в Казгидромете.

За последние 25–30 лет уровень науки о селях качественно вырос. Об этом свидетельствует и тот факт, что за десятилетие состоялись 3 международные конференции, на которых обсуждались вопросы механики селей, их прогноза и оценки риска. 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 [144] и А.И. Шеко [151], к настоящему времени стали библиографической редкостью.

Данная монография представляет собой попытку систематизации современных представлений о селях, претерпевших существенные изменения за последние два десятилетия. Изложенное выше определило содержание настоящей монографии. Она состоит из пяти глав. В первой главе раскрывается природа селей различных генезисов, описаны механизмы селеформирования. Значительное внимание уделено условиям, определяющим тенденцию изменения расхода и объема селей, а также плотности селевых смесей.

Во второй главе дано определение селевого бассейна и приведено описание особенностей стартовой и промежуточной зон, зоны разгрузки. Показано, что морфометрические характеристики конусов выноса позволяют с большой степенью достоверности определить их генезис.

В третьей главе описаны факторы, влияющие на селевую активность, приведены примеры взаимодействия факторов селеформирования. Подчеркивается главенствующая роль климатического фактора. Четвертая глава посвящена катастрофическим селям, имевшим место на северном склоне Заилийского Алатау. В этой главе основное внимание уделено механизмам зарождения и трансформации характеристик селей вплоть до их остановки.

В пятой главе рассмотрены некоторые аспекты проблемы оценки селевой активности и адаптации противоселевых мероприятий к резкому увеличению селевой активности, обусловленному глобальным потеплением климата. Описаны методы снижения селевой опасности в условиях изменяющегося климата.

Для более полной иллюстрации селепроявлений, отсутствующих в Заилийском Алатау, приведены сведения по территориям других стран.

В монографии использованы фотоматериалы В.П. Благовещенского, М.Д. Докукина, а также архива Казгидромета и КазНИИЭК (В.Е. Сербо, Б.С. Степанова, А.Х. Хайдарова и автора).

Автор выражает глубокую признательность всем лицам, способствовавшим изданию монографии. Особая благодарность генеральному директору РГП «Казгидромет» Т.К. Кудекову за реанимацию мониторинга селей – одной из важнейших составляющих обеспечения устойчивого развития Республики Казахстан.

Глава 1

ПРИРОДА СЕЛЕЙ

Сель, сіль (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) [8].

В Руководстве по организации и проведению работ по изучению селей на территории Республики Казахстан [105] 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 [121] под селом 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) [94, 144, 151].

Определение селя, приведенное в Большой советской энциклопедии, было сформулировано в середине 20 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. Большая Алматинка 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 смеси (упругостью, вязкостью, пластичностью), расходом и объемом селя, морфометрическими характеристиками пути движения селя. 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. Малая Алматинка, по разным оценкам, составлял 5–10 тыс. м³/с [24, 95]. Плотность селевых смесей, даже в течение одного процесса, колеблется в широком диапазоне – от 1100 до 2400 кг/м³ и более. Твердая составляющая селевой смеси может состоять из частиц горных пород различной величины: от долей микрона до 10 и более метров (рис. 1, 2). Их плотность может изменяться в пределах 2660–2710 кг/м³ для кислых и 2720–3190 кг/м³ для основных магматических пород, 2070–4000 кг/м³ для метаморфических пород и 1730–3670 кг/м³ для осадочных пород.

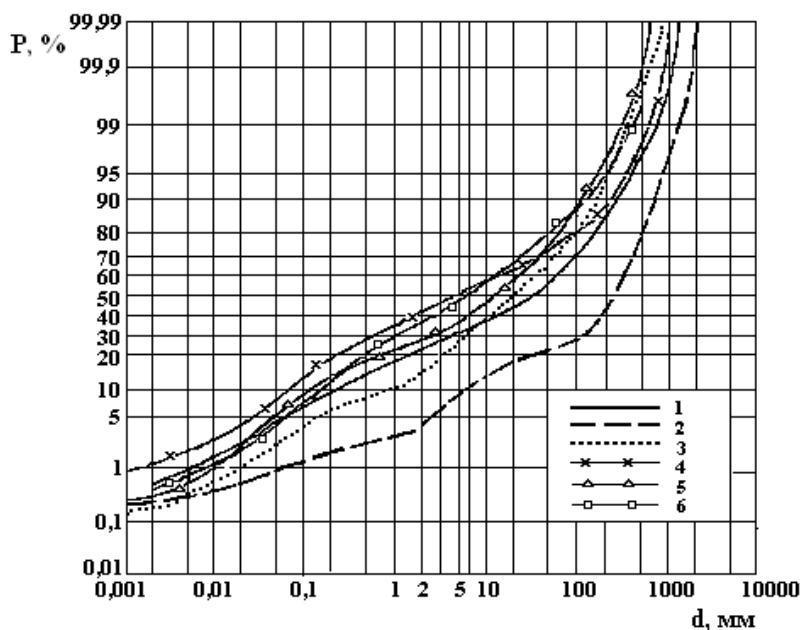


Рис. 1. Гранулометрические кривые селеформирующих грунтов восточных районов бывшего СССР. 1 – плато Путорана (бассейн оз. Аян), 2 – хр. Сихотэ-Алинь (бассейн р. Кема), 3 – хр. Западный Саян, 4 – хр. Хамар-Дабан, 5 – хр. Кодар, 6 – Камчатка (бассейн р. Сухая Хапица).

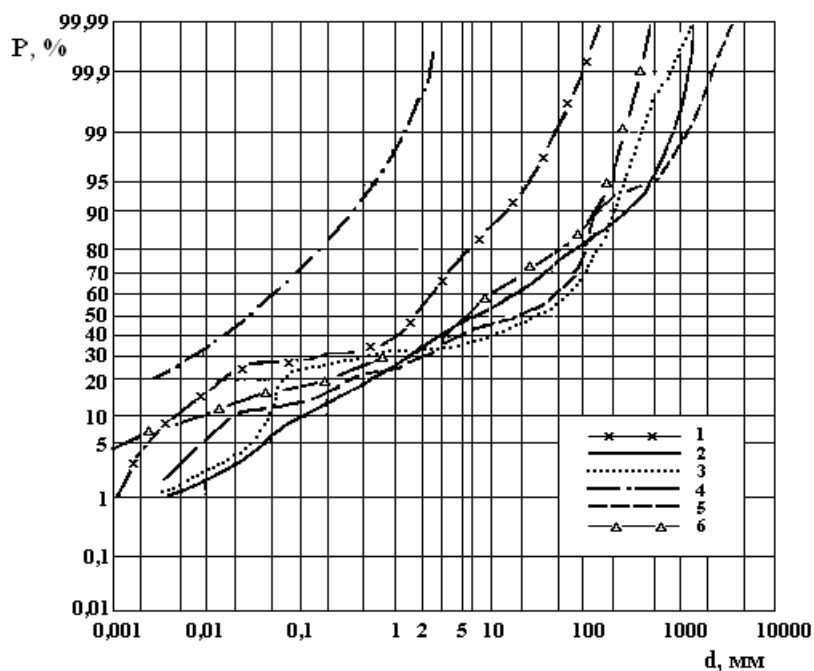


Рис. 2. Гранулометрические кривые селеформирующих грунтов южных районов бывшего СССР. 1 – Крым, 2 – Заалайский хребет, 3 – урочище Бордобе (Памир), 4 – Чуст-Папские адыры Ферганской долины, 5 – Тургенъ (хр. Заилийский Алатау), 6 – Горный Алтай.

Селевым смесям 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 смеси с ярко выраженным свойством пластичности возможно перемещение валунов весом несколько тонн в квазивзвешенном состоянии.

Скорость селевых потоков может изменяться в широких пределах – от 2 до 400 км/ч [23, 62]. 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 (рис. 3) [24], и квазиламинарным, при этом поток оставляет на берегах четкие границы (рис. 4) [62].



Рис. 3. Пятнадцатиметровая волна селя, окутанная грязевым облаком, входит в селехранилище в урочище Медеу 15 июля 1973 г.



Рис. 4. Следы прохождения селевого потока в бассейне р. Большая Алматинка 19 августа 1975 г.

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, а также хозяйственной деятельности человека и т.д.

Различия в механизмах формирования селей наиболее выражены в начальной фазе образования селевой массы. Образование первичной селевой массы происходит 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 смеси происходит как за счет 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 селевое явление [136].

1.1. Генезис селей Заилийского Алатау

1.1.1. Сели дождевого генезиса

В Заилийском Алатау преобладают сели дождевого генезиса (более 70 % всех случаев). Они могут образовываться как в низкогорной, так и в высокогорной зонах. Областью формирования дождевых селей могут быть как большие площади эродированных поверхностей (адыры), так и линейные морфологические образования (врез и рывтина).

Адыры – наиболее типичное морфологическое образование, в пределах которого в результате эрозии на больших площадях формируются сели (рис. 5). Они в основном сложены мощной толщей суглинков, глин, песчаников и конгломератов. Эти породы, даже при небольшом поверхностном стоке, легко поддаются эрозии. Поверхность адыров почти лишена растительного покрова, обладает слабой инфильтрационной способностью. При образовании поверхност-

ного стока селевая масса формируется как за счет плоскостного смыва, так и в результате эрозионных процессов в ручейковой сети. Как правило, в адырах формируются сели с малой плотностью, но при благоприятных условиях, когда селям предшествуют продолжительные дожди с низкой интенсивностью, могут формироваться мощные сели с плотностью около 2000 кг/м^3 [61].



Рис. 5. Чуст-Папские адыры Ферганской долины (фото А.Х. Хайдарова).

Врез (рис. 6) становится местом формирования дождевых селей, когда на его водосбор выпадают достаточно интенсивные и продолжительные жидкие осадки. Селевой процесс имеет место, если расход паводка превышает критическое значение. Такой паводок способен сорвать ранее образованную отмостку русла, создавая благоприятные условия для эрозионного процесса и сдвига рыхлообломочных пород. Однако для северного склона Заилийского Алатау характерна ситуация, когда во врез поступает не паводок, а сель, который сформировался в системе рытвин (рис. 7). Механизмы, приводящие к формированию селей дождевого генезиса в высокогорной зоне Заилийского Алатау, описаны в [122].

Катастрофические сели дождевого генезиса на северном склоне Заилийского Алатау формируются при выпадении интенсивных и продолжительных жидких осадков в высокогорной зоне, где имеются наиболее благоприятные условия для формирования селей с высокой плотностью. Выпадение таких

осадков связано с вторжением холодных воздушных масс, которым предшествует глубокое проникновение холода в южные районы Средней Азии и вытеснение тепла на территорию Заилийского Алатау. Ливневые жидкие осадки выпадают в высокогорной зоне только при значительной высоте нулевой изотермы (более 4000 м) [47].

Такие синоптические ситуации крайне редки, поэтому катастрофические сели дождевого генезиса в описываемом районе в условиях климата 20 века – редкое явление: один раз в несколько десятилетий. Известно 11 случаев прохождения селей дождевого генезиса в бассейне р. Малая Алматинка в 20 веке: 1902 г., 8 июля 1921 г., 27 августа 1927 г., 11 июля 1931 г., 22 мая 1932 г., 20 июня 1934 г., 25 мая 1941 г., 16 мая 1947 г., 4 июня 1954 г., 27 июня 1988 г., 14 июля 1999 г.



Рис. 6. Рывины и врезы, в которых образуются сели, возникающие в результате выпадения ливневых жидких осадков, интенсивного таяния снега и льда, а также прорыва внутриледниковых водоемов.



Рис. 7. Система рытвин, в которых зарождаются сели
дождевого генезиса.

Наиболее мощным селом в бассейне р. Малая Алматинка считается сель 1921 г. Ливнем была охвачена территория протяженностью около 150 км: от бассейна р. Чилик до бассейна р. Чемолган. Дождь выпал в высокогорной и среднегорной зонах. По мере удаления от бассейна р. Малая Алматинка количество и интенсивность осадков уменьшались. Гляциолог Н.Н. Пальгов, застигнутый ливнем в окрестностях г. Верный (Алма-Ата, ныне Алматы) 8 июля 1921 г., так описывает свои впечатления: «В момент наибольшей интенсивности, продолжавшейся 3–4 минуты, ливень представлял сплошной поток; ощущение от него было такое, какое появляется, когда окунешься с головой в воду; чтобы сделать вдох, приходилось для защиты носа прикладывать ладонь к козырьку фуражки, иначе не хватало воздуха и невозможно было дышать» [23]. В этот день на метеорологической станции Алматы (848 м) было зафиксировано 24 мм осадков, на высоте 1600–1700 м (урочище Медеу) – 72 мм. Достоверные данные об интенсивности осадков отсутствуют. По различным оценкам, она колебалась

в пределах от 2 мм/мин (среднее значение) до 18 мм/мин (максимальное значение) [23, 75]. Почти во всех бассейнах северного склона Заилийского Алатау прошли сели. Самый мощный сель образовался в бассейне р. Малая Алматинка. Объем селевого выноса, по различным оценкам, составил 1,6–3,5 млн. м³, расход селя – 1,5–5 тыс. м³/с. Сель нанес большой ущерб, погибло более 500 человек. Более подробно этот сель описан в главе 4.

Небольшие сели дождевого генезиса формируются на северном склоне Заилийского Алатау в среднегорной зоне. Их характеристики значительно уступают селям, сформировавшимся в высокогорной зоне. Ущерб, наносимый ими, незначителен.

1.1.2. Сели гляциального генезиса

Особое место среди селевых потоков занимают гляциальные сели, формирование которых связано с деятельностью ледников. Их возникновение, как правило, не связано с текущей гидрометеорологической ситуацией. Активизация гляциальных селей характерна для этапа деградации оледенения.

Прорыв водоемов моренно-ледниковых комплексов приводит к формированию водных паводков. Взаимодействие прорывных паводков с рыхлообломочными породами во врезках приводит к образованию селей. Гляциальные сели часто имеют большие расход и объем, что обусловлено значительными запасами воды и рыхлообломочных пород в очагах их зарождения. Опорожнение водоемов моренно-ледниковых комплексов может происходить как по подземным каналам стока, так и поверхностным путем в результате разрушения озерных перемычек.

Аккумуляция воды в емкостях моренно-ледниковых комплексов с последующим прорывом по подземным каналам стока относится к числу достаточно распространенных способов формирования прорывных паводков, которые приводили к образованию гляциальных селей в 1951 г. в бассейне р. Малая Алматинка [150], в 1958, 1963 гг. в бассейне р. Иссык [78], в 1973, 1974, 1979, 1993 гг. в бассейне р. Средний Талгар [4, 72, 152], в 1980 г. в бассейне р. Каскелен [72], в 1982 г. в бассейне р. Сарканд (Джунгарский Алатау) [139].

В результате закупорки подземного канала стока котловина на морене ледника Жарсай (бассейн р. Иссык) 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. м³ [97]. Объем селя 1963 г. – 5,8 млн. м³, максимальный расход – 7–12 тыс. м³/с [51]. Селем 1963 г. было уничтожено озеро Иссык. В 1977 г. котловина вновь заполнилась водой. Объем образовавшегося озе-

ра достиг 480 тыс. м³. Превентивный сброс воды из озера составил 420 тыс. м³ [77]. В результате естественного вскрытия подземного канала стока было сброшено еще около 60 тыс. м³ воды с расходом 35 м³/с, что привело к формированию селевого потока с максимальным расходом около 700–1000 м³/с и объемом около 300–400 тыс. м³ [77, 78]. Своевременно принятые меры по регулируемому опорожнению озера предотвратили формирование селя идентичного по мощности селю 1963 г.

В 1982 г. в бассейне р. Сарканд (Джунгарский Алатау) сформировался катастрофический сель. Причина возникновения селя – прорыв моренного озера Акколь по подземному каналу стока. Из озера, объем которого составлял 1,5 млн. м³, было сброшено более 400 тыс. м³ 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. м³. Сель прошел через территорию г. Сарканд с расходом около 300 м³/с, объемом 821 тыс. м³ и плотностью селевой массы 2120 кг/м³ [139].

Примером формирования селей в результате разрушения озерной перемычки может служить сель 1973 г. в бассейне р. Малая Алматинка. В 1973 г. разрушение перемычки моренного озера ледника Туюксу привело к формированию паводка с объемом 225 тыс. м³ и максимальным расходом около 350 м³/с. Продолжительность опорожнения около 30 минут. Взаимодействие мощного паводка с рыхлообломочными породами привело к формированию катастрофического селя с расходом около 10 тыс. м³/с и объемом 3,8 млн. м³ при плотности селевой массы 2390 кг/м³ [24]. Этот сель, а также сель 1963 г., сформировавшийся в бассейне р. Иссык, более подробно описаны в главе 4.

Известны многочисленные факты прорыва внутриледниковых водоемов на ледниках северного склона Киргизского хребта [22]. Достоверно известно, что в Заилийском Алатау прорыв внутриледникового водоема на леднике Туюксу был в 1956 г. В результате прорыва произошло излияние воды с максимальным расходом около 30 м³/с, количество избыточной, по отношению к «норме», воды приближенно оценивается в 1,5–2,0 млн. м³ [22].

1.1.3. Сели водоледового генезиса

Благоприятные условия для образования водоледовых селей создаются при резком понижении температуры воздуха, когда водная поверхность не защищена от переохлаждения ледяными образованиями. Интенсивный теплообмен между водной и воздушной массами приводит к переохлаждению воды, благоприятствующему образованию внутриводного льда, ледяных перемычек и т.д. В местах стеснения русла образуются зазоры. Образование зазора приводит к подъему

уровня воды непосредственно на участке зазора и выше по течению. В свою очередь увеличение уровня воды, при практически неизменном расходе, сопровождается уменьшением скорости потока и, следовательно, уменьшением турбулентного перемешивания. Это ухудшает условия образования внутриводного льда, но создает предпосылки для образования поверхностного льда. За счет увеличения смоченного периметра возрастает гидравлическое сопротивление. Это приводит к уменьшению скорости потока, дальнейшему увеличению уровня воды и выходу ее на поверхность образующегося ледяного покрова. Описанный процесс многократно повторяется и, как следствие, образуется «слоеный пирог» из тонких прослоек льда и воды. Уровень заполнения русла водоледовыми образованиями может превышать 2 м, тогда как до наступления низких температур уровень воды не превышал нескольких десятков сантиметров. Суммарные потери стока на ледообразование и подъем уровня воды в реке могут достигать десятков тысяч кубометров.

Неоднородность морфологических характеристик по длине реки приводит к формированию системы водоледовых образований ступенеобразной формы (рис. 8). Их разрушение в результате быстрого потепления, антропогенного воздействия или недостаточной прочности отдельных ступеней водоледовых образований может приводить к формированию водоледового потока. По механизму и составу эти потоки могут быть отнесены к селям: лавинообразное нарастание расхода, большая концентрация льда (твердой составляющей). Особенностью водоледового селя является формирование одиночной волны, так как при ее прохождении в движение вовлекается практически весь лед, находящийся в русле, и снежный покров, попадающий в зону воздействия потока (рис. 9). В течение зимы неоднократное формирование водоледовых селей становится возможным при чередовании теплых и холодных периодов.

Расход водоледовой волны может в 100 раз и более превышать расход воды в реке, предшествовавший селевому процессу. При прохождении почти 6-километрового пути расход водоледовой волны в бассейне р. Малая Алматинка 28 ноября 1987 г. увеличился с 1 до 120 м³/с [80]. Динамическое воздействие водоледовых масс настолько велико, что может приводить к разрушению мостов и гидротехнических сооружений. Так, прохождение упомянутого выше водоледового селя по быстротоку селехранилища, расположенного на р. Весновка выше проспекта Аль-Фараби, привело к существенному нарушению прочности железобетонных конструкций. Впоследствии быстроток был полностью разрушен рядовыми паводками вследствие активизации под ним суффозионных процессов. При медленном потеплении и в отсутствии антропогенного воздействия водоледовые образования могут разрушаться постепенно, не вызывая селя (рис. 10).



Рис. 8. Две ступени водоледовых образований (общей длиной около 50 м), сохранившиеся на пятикилометровом участке после прохождения водоледового селя 5 января 2006 г. на р. Узункаргалы. На заднем плане (справа) видны следы максимальных отметок водоледового селя, «проскользившего» по поверхности водоледовых образований (фото автора).



Рис. 9. Русло р. Малая Алматинка после прохождения водоледового селя 28 ноября 1987 г.



Рис. 10. Тот же участок русла р. Малая Алматинка после потепления, не сопровождавшегося водоледовым селом (2006 г.) (фото Б.С. Степанова).

1.1.4. Водоснежные сели

Водоснежные сели – русловое движение смеси воды и снега с возможным участием рыхлообломочных пород, объемная концентрация которых не превышает 5–7 %. Плотность селевой смеси может изменяться от 900 до 1100 кг/м³ [94]. Водоснежные сели распространены в основном в горных районах субарктики. Наибольшее распространение на территории СНГ водоснежные сели получили в северных районах России (Полярный и Приполярный Урал, Хибин, Магаданская область, горные районы северо-востока) [6, 18, 83, 92]. Однако они формируются и в горных районах Тянь-Шаня [109].

Различают два генетических типа водоснежных селей: водоснежные потоки «сплошного слоя» [106] и гидронапорные сели (гидронапорные лавины [104]). Водоснежные потоки «сплошного слоя» образуются в результате ослабления силы сцепления и увеличения сдвигающей силы на контакте снежная толща – подстилающая поверхность вследствие водонасыщения толщи снега за

счет таяния его поверхностного слоя. Очагами зарождения водоснежных селей «сплошного слоя» могут быть даже относительно пологие склоны. Гидронапорные сели возникают в результате сдвига водонасыщенных снежных масс вследствие разности давлений в сдвигающейся толще. Очагами зарождения водоснежных селей гидронапорного генезиса служат отрицательные формы рельефа, в которых накапливаются значительные толщи навесного снега, их мощность может превышать 10 м (рис. 11).



Рис. 11. Место отрыва водонасыщенной снежной массы, приведшей к формированию водоснежного селя. Стрелкой указан «подземный канал стока» (фото В.П. Благовещенского).

Формируются водоснежные сели в период снеготаяния, при оттепелях с резким подъемом температуры воздуха, реже селеформирование вызывается дождем. Механизмы водонасыщения снежных масс и переход их в неустойчивое состояние недостаточно изучены. Однако общая картина процесса подготовки водоснежной массы к сдвигу, причины сдвига и основные особенности движения водоснежных масс установлены [59, 67].

В ординарных условиях движение талых вод в каналах стока безнапорное. При интенсивном снеготаянии или выпадении жидких осадков расход воды в канале стока увеличивается. Однако с увеличением глубины потока увеличение

смоченного периметра может происходить быстрее, чем площади поперечного сечения потока. Вследствие этого гидравлический радиус уменьшается, хотя глубина растет. При прямоугольной форме канала стока, когда ширина потока значительно больше его глубины, в момент полного заполнения канала стока гидравлический радиус скачкообразно уменьшается почти в два раза [59]. При этом происходит переход движения воды из безнапорного режима в напорный. Вследствие повышения давления вода насыщает снежную толщу, расположенную над каналом стока, увеличивая сдвигающее напряжение. Исключительно важным является и то обстоятельство, что при этом в снежной толще происходит аккумуляция воды. Объем накопленной воды может составлять десятки и сотни тысяч кубометров.

При превышении сдвигающим напряжением удерживающего происходит сдвиг водонасыщенных снежных масс. На своем пути они вовлекают в движение русловую воду, лед, снежные массы, аллювий, увеличивая расход и объем потока. Благодаря этому в руслах, в которых даже в паводок водные расходы не превышают нескольких кубометров в секунду, могут формироваться водоснежные потоки с расходом сотни кубометров в секунду [76]. Плотность снега и льда меньше плотности воды, поэтому необходимость затраты энергии для их поддержания во взвешенном состоянии отсутствует. Водоснежные потоки могут перемещаться на десятки километров.

1.1.5. 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. Иссык 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 выраженное свойство вязкопластичности, обуславливающее 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 своем большинстве перемычки наиболее крупных водоемов моренно-ледниковых комплексов достаточно прочные сооружения, представленные, как правило, моренным материалом, сцементированным льдом. Однако термокарстовые процессы способны значительно ослабить 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, приводят к образованию толщи 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. Большая Алматинка), образовавшиеся в результате Верненского землетрясения в 1887 г. (рис. 12).

Известны случаи, когда землетрясения провоцировали выдающиеся по масштабам селевые явления. Наибольшую известность получил сель в Перуанской Западной Кордильере, вызванный обрушением ледовых масс в результате землетрясения 1970 г. [22]. 31 мая 1970 г. в результате мощных сейсмических толчков от ледника Хелмес (6740 м) вершины Уаскаран откололся и обрушился огромный блок льда и горных пород. По оценке Л. Ллибутри, в селевом процессе приняли участие 7 млн. м³ скальной породы, 1 млн. м³ льда с вершины, 4–5 млн. м³ фирна с нижнего ледника, 30 млн. м³ моренных и флювиогляциальных отложений. В створе г. Юнгай (2570 м) объем селевой массы составлял 23 млн. м³ [22]. Средняя скорость продвижения фронта потока на 14-километровом участке от подошвы Уаскарана (5700 м) до г. Юнгай

оценена приблизительно в 110 м/с [165, 167]. Мощные селевые явления имели место на Аляске во время землетрясения 27 марта 1964 г. [22].

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 в высотном интервале 1500–1800 м на протяжении 35 км вдоль хребта. Общий объем перемещенных пород на северном склоне Заилийского Алатау оценен И.В. Мушкетовым в 440 млн. м³ [81]. События, вызванные землетрясением 1887 г., более подробно описаны в главе 4.



Рис. 12. Фрагмент поверхности очага рассредоточенного селеобразования Кокчека, бассейн р. Большая Алматинка.

1.1.6. Сели антропогенного генезиса

Далеко не последнее, а иногда даже решающее значение в формировании селевых потоков, прежде всего в среднегорной и низкогорной зонах, имеет 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, расположенного в песках Жаманкум вблизи г. Алматы [145, 146]. Объем селя составил 72,5 млн. м³, т.е. почти в 20 раз превышал объем селя 1973 г. в бассейне р. Малая Алматинка, максимальный расход достигал 1,5–2,5 тыс. м³/с, плотность селевой массы составляла 1900±20 кг/м³ (рис. 13). Сель нанес большой ущерб, погибли люди. Этот сель подробно описан в главе 4.



Рис. 13. Каньон, образовавшийся в результате формирования селя 28–29 января 1988 г. (фото А.Х. Хайдарова).

Неправильное проектирование и эксплуатация оросительных систем, бесконтрольный полив становятся причиной водонасыщения больших массивов грунтов. В последнем десятилетии 20 века наблюдались десятки случаев формирования оползней в низкогорной зоне северного склона Заилийского Алатау, трансформировавшихся в сели. Площади оползней обычно не превышали нескольких сотен квадратных метров, объемы – нескольких тысяч кубометров. На рисунке 14 показана ниша отрыва оползня, вызванного наруше-

нием герметизации трубы водовода, имевшего место в бассейне р. Аксай (дачный массив «Горный садовод»). В результате разжижения грунта образовался грязевой поток, разрушивший дачное строение, погибло 2 человека.



Рис. 14. Оползень, трансформировавшийся в селевой поток
(фото А.Х. Хайдарова).

Колебания, вызываемые 6–7 балльными землетрясениями, способны привести к нарушению устойчивости водонасыщенных грунтов, их оползанию и трансформации в сели с объемом миллионы кубометров. Примером селевой деятельности, обусловленной вышесказанным, могут служить оползни и сели, сформировавшиеся во время Гиссарского землетрясения 23 января 1989 г. [21]. Район Гиссарского землетрясения является одним из наиболее освоенных в Гиссарской долине. За 20-летний период эксплуатации оросительной системы потери воды на инфильтрацию превышали 50 млн. м³. В толще лессового массива появилась зона переувлажнения мощностью 24–28 м. В результате землетрясения образовалось 4 крупных оползня. Наибольший из них имел объем 60–65 млн. м³, 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, иллюстрирующим последствия отсутствия нормативных документов, регламентирующих проектирование и строительство объектов, которые при определенных условиях представляют селевую опасность, яв-

ляется катастрофический сель, сформировавшийся 13 марта 1961 г. на территории г. Киева [154]. Верхняя часть оврага Бабий Яр заполнялась отходами добычи глины методом гидротранспорта. За период 1954–1961 гг. было намыто грунта объемом около 3,2 млн. м³. Высыхание намытого грунта происходило только в поверхностном слое мощностью около 1 м. Основная толща грунта находилась во влажном состоянии. Небольшой паводок, образовавшийся 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, оценивается в 600 тыс. м³. Глубина потока на территории города, примыкающей к оврагу, была около 4 м, площадь затопления достигла 0,25 км². Сель нанес большой ущерб, погибло 143 человека. По данным [17], описанная катастрофа унесла жизни 1500 человек.

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 приводит к 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 произошел 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 20 века [134].

Водохранилища в горах представляют потенциальную опасность для объектов, находящихся в нижележащей части долины. Нарушение устойчивости склонов и их оползание в водохранилище может привести к разрушению плотины и формированию катастрофического паводка, трансформирующегося в селевой поток. Подобная катастрофа произошла в Италии на р. Пьяве в 1963 г. [82]. 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.

1.2. Механизмы селеформирования

В соответствии с терминологией, принятой в Руководстве по организации и проведению работ по изучению селей на территории Республики Казахстан

[105], различают три типа селевых процессов: транспортный, эрозионно-сдвиговый и сдвиговый.

Характер селевых процессов определяется действием обратных связей. Под обратными связями, в данном случае, понимают воздействие увеличения или уменьшения концентрации частиц в селевой смеси на характер дальнейшего развития процесса. Различают отрицательную обратную связь, которая приводит к уменьшению возможности дальнейшего увеличения плотности селевой смеси, и положительную обратную связь, действие которой благоприятствует дальнейшему увеличению плотности селевой смеси. Наличие положительной обратной связи способствует переходу системы «поток – русло» в другое устойчивое равновесное состояние или вызывает лавинообразное увеличение плотности до установления устойчивого равновесного состояния [120].

Сущность **транспортного селевого процесса** заключается в создании условий для вовлечения твердой составляющей в движение и придания ей кинетической энергии. Транспортный селевой процесс приводит к формированию наносоводных селей, которые характеризуются низкой плотностью ($< 1800 \text{ кг/м}^3$). Для транспортного селевого процесса характерно преобладание отрицательных обратных связей. С увеличением концентрации наносов в потоке возможность дальнейшего насыщения потока наносами уменьшается. Это объясняется тем, что транспорт наносов в потоке происходит в основном за счет энергии воды. Концентрация наносов в потоке находится в однозначной зависимости от уклона русла при постоянных гранулометрическом составе и глубине потока. Чем больше уклон русла, тем больше может быть плотность селя при прочих равных условиях.

Механизм транспорта наносов паводком идентичен механизму транспорта наносов описываемым селевым явлением. Отличие паводков от наносоводных селей состоит в том, что концентрация наносов в наносоводных селях значительно больше. Это приводит к ухудшению потребительских свойств среды, представленной смесью воды и наносов. Наносоводные сели вызывают затруднения при водоснабжении, орошении, работе гидроэлектростанций и т.д. [121].

Эрозионно-сдвиговый селевой процесс – процесс взаимодействия водных потоков с рыхлообломочными породами, включающий в себя размыв грунта, сдвиг и вовлечение в движение крупных частиц и локальных массивов рыхлообломочных пород, приводящий к формированию селевых потоков [121].

Важнейшими селеформирующими факторами являются уклон русла и расход водного паводка. При превышении ими критических значений развивается селевой процесс, при этом создаются условия, исключающие возможность формирования отстойки русла. Важная роль принадлежит гранулометрическому и минералогическому составам рыхлообломочных пород. Селевой

процесс продолжается до тех пор, пока не будут исчерпаны запасы рыхлообломочных пород или значения расхода потока и уклона русла приобретут значения меньше критических. Это приведет к формированию отмытки и затуханию селевого процесса.

При эрозионно-сдвиговом селевом процессе, как и при транспортном, создаются условия для вовлечения рыхлообломочной породы в движение и придания ей кинетической энергии. Однако в отличие от транспортного процесса вовлечение рыхлообломочной породы в селевой процесс требует затрат энергии со стороны потока только в начальной стадии, в дальнейшем эти затраты компенсируются за счет потенциальной энергии частиц горных пород. В ходе эрозионно-сдвигового селевого процесса может формироваться селевая смесь с плотностью близкой к плотности горных пород, участвующих в селевом процессе. При средней плотности рыхлообломочных пород (характерных для Зайлийского Алатау) равной 2650 кг/м^3 , плотность селевой смеси может достигать 2400 кг/м^3 и более.

В ходе эрозионно-сдвигового селевого процесса возможно значительное углубление русла (рис. 15). В результате углубления русла (до нескольких десятков метров) устойчивость бортов вреза уменьшается и происходит обрушение грунта, объем которого может превышать объем грунта, вовлеченного в селевой процесс в ходе эрозионного процесса. Особенно большие объемы обрушений и сдвига имеют место при высокой степени увлажнения рыхлообломочных пород. Так, через сутки после окончания селя 1973 г. в прирусловой области р. Малая Алматинка происходили единовременные сдвиги водонасыщенных пород объемом до 100 тыс. м^3 , трансформировавшиеся в селевую массу [137]. При наличии больших объемов рыхлообломочных пород в очагах селеформирования, высокой степени их увлажнения, большой длине очага (несколько сотен метров) могут развиваться цепные селевые процессы [136]. В ходе цепных селевых процессов расход и объем селей возрастают лавинообразно. На входе и выходе очага селеобразования расход и объем потока может отличаться на несколько порядков.

Под сдвиговым селевым процессом понимают нарушение устойчивости увлажненных рыхлообломочных пород и перемещение их в виде руслового потока без нарушения сплошности среды.

На рисунке 16 приведен пример трансформации оползня в селевой поток в бассейне р. Каракол (хр. Терской Алатау). В верхней части рисунка видна ниша отрыва, имеющая воронкообразную форму, в средней части – русло, по которому грунт, приобретший способность к течению, переместился на относительно малый уклон, где образовался конус выноса (нижняя часть рисунка).

Сдвиговый селевой процесс происходит, когда сдвигающие силы превышают удерживающие, при этом имеет место изменение физико-механических

свойств грунта. В ходе его деформации резко уменьшается кулоновское трение, обретается свойство текучести. Способность грунта к разжижению определяется степенью увлажнения, гранулометрическим составом пород и минералогическим составом пылевато-глинистых фракций. Важную роль в создании условий, благоприятствующих сдвиговому селевому процессу, играет аномальное увлажнение грунта. Начальная фаза сдвигового селевого процесса и оползня идентичны. Оползни трансформируются в сели в ходе прогрессирующей деформации.



Рис. 15. Углубление селевого вреза на р. Кумбель
после 3–4 августа 1977 г.

К факторам, благоприятствующим сдвигу, следует отнести подрезку склонов водными и селевыми потоками, суффозию, изменение физико-механических характеристик грунта во времени. Факторами, препятствующими сдвигу, являются кулоновское трение, сцепление (обусловленное наличием в составе рыхлообломочных пород глинистых или других цементирующих частиц, промерзанием пород), зацепление (влияние которого особенно заметно,

когда мощность сдвигаемых пород соизмерима с размерами максимальных частиц, входящих в состав грунта), корневая система деревьев и другой растительности. Важным фактором, препятствующим сдвигу относительно тонких слоев грунта, служит сила капиллярного притяжения [61].



Рис. 16. Области формирования, движения и остановки селя, сформировавшегося в результате сдвигового селевого процесса (фото А.Х. Хайдарова).

Областью развития сдвиговых селевых явлений могут служить как отрицательные, так и положительные формы рельефа, поскольку относительно большое увлажнение грунта в отрицательных формах рельефа может оказывать на сдвиг влияние, подобное большому уклону положительных форм, образуемых менее увлажненными грунтами.

Наиболее типичным сдвиговым селевым процессом в высокогорной зоне является сдвиг водонасыщенных рыхлообломочных пород, накапливающихся в межселевые периоды, в склоновых ложбинах (рытвинах) [122].

Представителями селевых очагов, в которых сели зарождаются в ходе потери устойчивости водонасыщенными рыхлообломочными породами, являются рытвины, примыкающие к двум селевым врезам, расположенным в моренных отложениях ледника пика Советов (бассейн р. Большая Алматинка), и рытвина, примыкающая к скальному массиву правого борта р. Малая Алматинка, расположенная напротив метеорологической станции Мынжилки (см. рис. 6, 7). Общий вид рытвины, примыкающей к левому (южному) врезу (см. рис. 6), показан на рисунке 17. Эта рытвина, образованная в моренных отложениях, имеет уклон 31° , длину 700–800 м, площадь водосбора $0,9 \text{ км}^2$. Она расположена в высотной зоне 2900–3400 м.



Рис. 17. Общий вид рытвины, примыкающей к леднику пика Советов (фото А.Х. Хайдарова).

Особенность заполнения рытвин рыхлообломочными породами заключается в том, что крупные частицы, при их перемещении с прилегающих склонов на дно рытвины, имеют наибольшую вероятность опуститься на наиболее низкие отметки дна. При этом образуется каркас из относительно крупных частиц (100–500 мм), в поровом пространстве которых и формируется подземный канал стока. Со временем канал перекрывается сверху частицами различного размера. Обычно поперечные размеры сечения каналов стока не превышают 500 мм. В зависимости от размера рытвин глубина залегания подземного канала стока может колебаться от долей метра до нескольких метров.

В подземном канале концентрируется подземный сток, формирующийся в результате выпадения ординарных осадков на водосборную поверхность рывины, таяния снега и льда, находящихся в поровом пространстве моренных отложений. В холодный период года сечение канала стока может уменьшаться за счет намораживания льда.

Если канал стока не обеспечивает безнапорный пропуск паводка, происходит переход безнапорного режима течения воды в напорный. Процесс перераспределения давления в горных породах, окружающих канал стока, занимает определенное время. Поэтому, если напорное движение кратковременно, никаких видимых изменений не происходит (заполнение порового пространства водой «сглаживает» гидрограф паводка). При длительном режиме напорного движения воды в канале стока происходят обводнение большого объема рыхлообломочных пород, потеря ими устойчивости и, как следствие, сдвиг с формированием селевого потока.

В редких ситуациях, когда напорное движение продолжается десятки минут и даже часы, объемы обводненных пород могут составить тысячи кубометров при расходах подземных потоков, не превышающих долей кубометра в секунду. Аккумуляция значительных объемов воды в поровом пространстве массива рыхлообломочных пород создает предпосылки для формирования мощных грязекаменных потоков в результате потери устойчивости этими массивами. Смешиваясь с паводковыми водами других частных бассейнов, потоки многократно увеличивают свои характеристики за счет вовлечения в селевой процесс увлажненных грунтов, вмещающих русла водотоков.

1.3. Условия существования селей

Как отмечалось выше, грязекаменные сели образуются в результате сдвига водонасыщенных грунтов или взаимодействия водных потоков с рыхлообломочными породами на относительно больших уклонах. При выходе селей в долины или на конусы выноса, имеющие относительно малые уклоны, сели могут вовлекать в селевой процесс рыхлообломочные породы, частично распадаться или останавливаться без распада. Реализация перечисленных ситуаций зависит от энергетических возможностей селевых потоков.

Энергетический подход к определению транспортирующей способности потоков лежит в основе гравитационной теории движения взвешенных наносов М.А. Великанова. Однако перенос отдельных положений этой теории ее автором на селевые потоки оказался неплодотворным. Причина тому – недооценка влияния полидисперсности гранулометрического состава селеформирующих грунтов на реологические свойства селевых смесей [120].

Дальнейшее развитие энергетического подхода к определению транспортирующей способности селевых потоков получило в работах Б.С. Степанова. Результаты исследований, проведенных в последние десятилетия, показали, что полидисперсный состав твердой составляющей селевых смесей, в отличие от монодисперсного, способствует резкому уменьшению влияния концентрации твердых частиц на вязкость и пластичность селевых смесей [27, 29]. Вследствие этого, при определенных условиях, турбулентный режим движения селей может сохраняться не только до значений объемной концентрации равных 0,3–0,5, как считалось ранее [16, 30], но и более 0,8. Это приводит к качественным изменениям механизмов селевых процессов. Если в селях с низкой плотностью селевой смеси вода перемещает твердую составляющую, то в селях с высокой плотностью селевой смеси она придает селевой смеси свойство текучести. Основным источником энергии селей с низкой плотностью селевой смеси является энергия воды, которая в определенной мере тратится на перемещение твердой составляющей (основная часть энергии затрачивается на нагревание), в то время как основным источником энергии селей с высокой плотностью селевой смеси является энергия ее твердой составляющей. Действительно, если при плотности 1495 кг/м^3 ($C = 0,3$) вклад твердой и жидкой составляющих селевой смеси в общую энергию потока приблизительно одинаков, то при плотности селевой смеси 2320 кг/м^3 ($C = 0,8$) вклад твердой составляющей более чем в 10 раз превышает вклад водной составляющей.

Из графика, приведенного на рисунке 18а, следует, что мощность, необходимая для поддержания твердой составляющей во взвешенном состоянии, с ростом концентрации сначала увеличивается, а затем уменьшается. Мощность, которой располагает поток на взвешивание твердой составляющей, в ситуациях, представляющих практический интерес, также возрастает с увеличением концентрации твердой составляющей в селевой смеси, а затем резко уменьшается (рис. 18б), когда концентрация возрастает до значений, при которых потери энергии на нагревание, из-за вязкости смеси, составляют основную долю от полной энергии потока. Смещение экстремума функции (б) в область высоких концентраций относительно экстремума функции (а) приводит к неоднозначности функции, описывающей зависимость между плотностью селевой смеси и минимальным уклоном, на котором селевая смесь может существовать без остановки и распада (рис. 19). Объясняется это тем, что кривая равновесных состояний (именуемая в дальнейшем *Z*-функцией) в описываемой ситуации имеет участок с отрицательным наклоном. *Z*-функция – результат совместного решения уравнений, описывающих функции, показанные, в частности, на рисунке 18а, б.

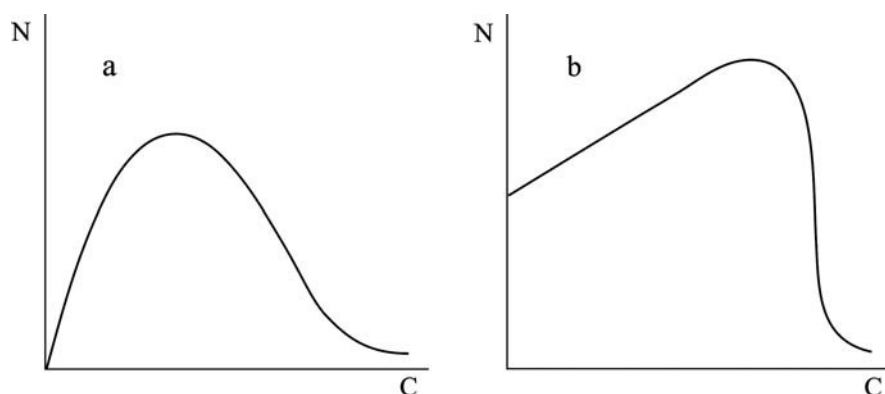


Рис. 18. Зависимость мощности, необходимой для поддержания твердой составляющей селевой смеси во взвешенном состоянии (a) и мощности, которой располагает поток на взвешивание твердой составляющей (b) от концентрации частиц в селевой смеси.

На кривой равновесных состояний, имеющей участок с отрицательным наклоном, ветви 1 и 2 представляют собой совокупность точек устойчивого равновесия селевой смеси, ветвь 3 – неустойчивого равновесия. Таким образом, Z-функция делит фазовую плоскость на область распада (N) и область набора (M), что позволяет прогнозировать эволюцию селевого потока [120].

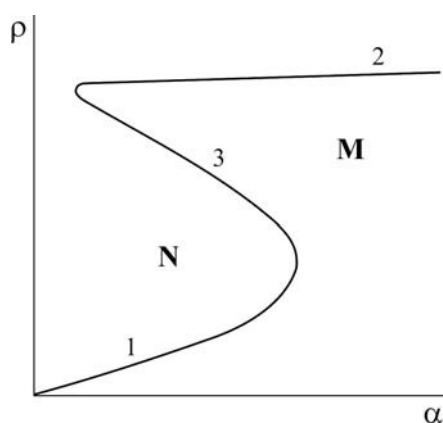


Рис. 19. Кривая равновесных состояний.

Теоретические представления об условиях существования селей подтверждаются данными наблюдений за прохождением селевых потоков в различных регионах (рис. 20) и позволяют осуществлять количественную интерпретацию тех особенностей селевых процессов, которые не находили даже качественного объяснения в рамках общепринятых представлений о селевых явлениях [120].

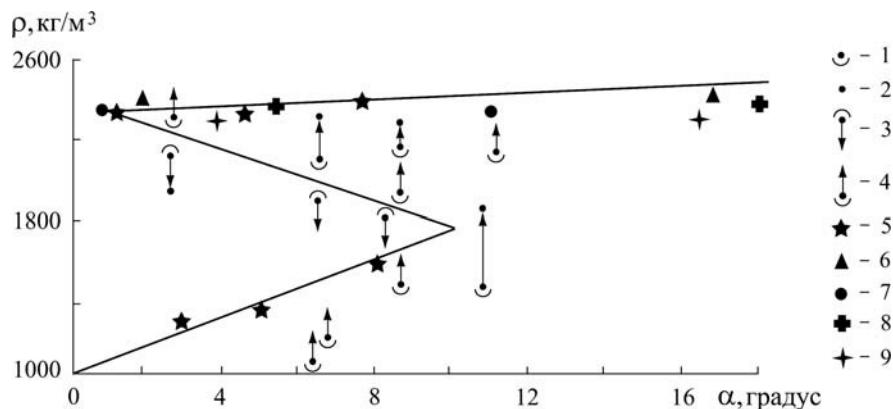


Рис. 20. Результаты экспериментальных исследований кривых равновесных состояний: 1 — начальное значение плотности, 2 — конечное значение плотности, 3 — распад селевой смеси, 4 — обогащение селевой смеси, 5 — данные, полученные на круговом лотке. Данные наблюдений: 6 — сель 1921 г. (бассейн р. Малая Алматинка), 7 — сель 1982 г. (бассейн р. Сарканд), 8 — сель 1963 г. (бассейн р. Иссык), 9 — искусственный сель 1975 г. (Чемолганский экспериментальный полигон).

Характер изменения Z -функций, показанных на рисунках 21а, б, в, становится понятным при сопоставлении их с графиками, иллюстрирующими зависимость мощности, необходимой для взвешивания твердой составляющей селевой смеси, и мощности, которой располагает поток на взвешивание частиц, от плотности селевой смеси (концентрации твердой составляющей в селевой смеси) при различных глубинах потоков и уклонах русел (рис. 21а, б, в $H_1 < H_2 < H_3$; $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \alpha_4 \dots$). Гранулометрический состав селеформирующих грунтов выбран таким, чтобы частицы в потоке перемещались во взвешенном состоянии даже при минимальных глубинах потоков и уклонах русел.

На рисунке 21а представлена ситуация, типичная для малых глубин потоков (доли, первые единицы сантиметров). Уже небольшое увеличение концентрации частиц в селевых смесях приводит к затуханию турбулентного перемешивания в толще потоков, поэтому Z -функция однозначна. Плотность селевой смеси находится в прямой зависимости от уклона русла (рис. 21а).

Из рисунка 21б следует, что с увеличением глубины потоков выполаживание графиков зависимостей между мощностями, которыми располагает поток на взвешивание твердой составляющей, и плотностями приводит к появлению точки перегиба у соответствующей Z -функции (рис. 21б). Однако Z -функция остается однозначной. Объясняется это тем, что увеличение плотности селевой смеси сначала благоприятствует взвешиванию за счет уменьше-

ния скорости группового (стесненного) падения частиц (увеличение вязкости смеси при этом практически не сказывается на характеристиках перемешивания в потоках), при дальнейшем увеличении плотности транспортирующая способность потока уменьшается из-за затухания перемешивания, обусловленного возрастанием вязкости смеси.

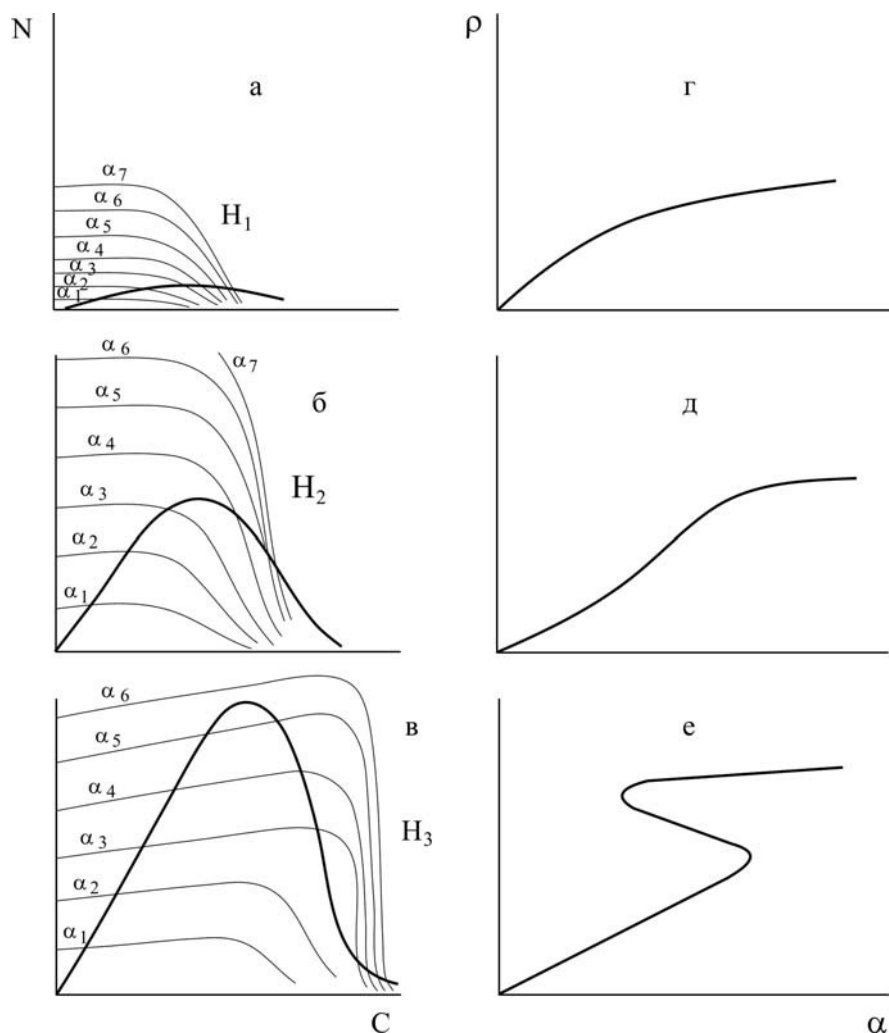


Рис. 21. Зависимость мощности (N), необходимой для поддержания твердой составляющей селевой смеси во взвешенном состоянии (жирные линии) и мощности, которой располагает поток на взвешивание (тонкие линии), от концентрации твердой составляющей (C) (а, б, в) при $H_1 < H_2 < H_3$ и $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \alpha_4 \dots$; и соответствующие им Z -функции (г, д, е).

Рисунок 21в соответствует ситуации, когда глубина потока относительно велика. При этом турбулентное перемешивание сохраняется до очень больших значений концентрации: Z -функция становится неоднозначной (рис. 21е). Именно такая ситуация характерна для селепроявлений, представляющих практический интерес.

При полидисперсном гранулометрическом составе твердой составляющей селевых смесей, включающем в себя частицы с размерами от долей микрона до нескольких метров, важную роль в существовании селей играют архимедова сила и свойство пластичности селевой смеси, которая по отношению к крупным частицам может рассматриваться как дисперсионная среда.

Теория существования селей играет ключевую роль в понимании природы селевых явлений [120]. Выявленные закономерности существования селей позволили разработать методы расчета характеристик селей, изменяющихся во времени и пространстве [121]. Селевые процессы, протекающие в руслах, не зависят от природы их начальной фазы. Развитие селевых процессов (обогащение селевой смеси твердой составляющей или ее частичный распад) определяется состоянием системы «поток – русло».

1.4. Распространение селей

Сели формируются в большинстве горных регионов земного шара. Они возникают повсеместно, где имеются или создаются условия для их образования. На территории Европы сели наиболее распространены в пределах Альп, в Скандинавских горах, горной части Исландии, Кольском полуострове, горных районах Молдавии, Украины, Северном, Приполярном и Полярном Урале, Северном Кавказе и Закавказье (некоторые географы относят Кавказ к Азии). В Азии сели широко распространены в Казахстане и Средней Азии, Алтае, Саянах, Прибайкалье, Дальнем Востоке и Приморье, Сахалине и Камчатке, Передней, Юго-Западной и Центральной Азии, Восточной и Юго-Восточной Азии, на полуострове Индостан и Японских островах.

В Северной Америке район распространения селей занимает около 30 % общей территории материка. Развитие селей в основном связано с крупными горными сооружениями: Кордильерами, Аппалачами и горами Арктического Севера [149]. Сели широко распространены и на территории Южной Америки [22, 23]. Селевая деятельность в Южной Америке развита в горной системе Андийских Кордильер, в юго-восточной части Бразильского нагорья [10].

В Африке сели распространены в горах Алжира и некоторых других районах континента. Селеподобные потоки во время ливней проносятся по сухим долинам (*вади*) в пустынях Северной Африки, Западной и Юго-Западной Азии

и т.д. (рис. 22). Аналогичные явления отмечены и в ряде районов Австралии [101]. Селевые потоки имеют место и на островах в океане [23].



Рис. 22. Вади в Иудейской пустыне (фото автора).

К селеопасным горным районам в Казахстане относятся: хребты Казахского Алтая, Саур-Тарбагатай, Джунгарский Алатау, Заилийский Алатау, Жетыжол, горы Киндиктас, Чу-Илийские горы, Каратау, Кетмень, казахстанская часть Терской Алатау, Кунгей Алатау, Киргизского хребта, Таласского Алатау, Угамского хребта, хребта Каржантау. Отмечены случаи прохождения селей в горах полуострова Мангышлак и в центральной части Казахского мелкосопочника. Как показывает практика, сели антропогенного генезиса могут возникать даже там, где в природных условиях они возникнуть не могут (пустыня Жаманкум, 1988 г.) [145]. Хребет Заилийский Алатау относится к наиболее селеопасным районам СНГ.

В горных районах Казахстана насчитывается около 300 селевых бассейнов, где с 1841 по 1990 гг. зарегистрировано около 788 случаев формирования селей. Наиболее высокой селевой активностью отличаются бассейны рек Заилийского и Джунгарского Алатау [43]. Наиболее крупными селевыми катастрофами Заилийского Алатау являются сели 1921 и 1973 гг. в бассейне р. Малая Алматинка, сели 1963 г. в бассейне р. Иссык, сели 1977 г. в бассейне

р. Большая Алматинка. Погибли люди, материальный ущерб исчислялся десятками миллионов долларов [25].

На большом количестве фактического материала была выявлена закономерность распределения типов селей в различных поясах гор [101, 149]. Сели, возникающие в различных поясах гор, имеют некоторые особенности. Наибольшей мощностью и катастрофичностью отличаются сели с высокой плотностью, возникающие в высокогорье, где сосредоточены основные селевые очаги. Сели с высокой плотностью, формирующиеся в среднегорье, бывают обычно меньших размеров, что связано с уменьшением запасов рыхлообломочных пород, иногда с уменьшением уклонов и лучшей залесенностью и задернованностью склонов. Сели с низкой плотностью чаще всего распространены в низкогорье (в частности, на эродированных поверхностях типа «адыров»), а также частично в пределах среднегорий. Сели, формирующиеся в низкогорье, бывают непродолжительными и относительно маломощными.

Глава 2

СЕЛЕВОЙ БАССЕЙН И ЕГО СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ

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 [105]. В селевом бассейне различают три основные зоны: стартовую (зона зарождения, селевые очаги), промежуточную (транзитная) и разгрузки (зона отложения, конусы выноса). Продольные профили, построенные от истоков рек до подошв конусов выноса основных рек северного склона Заилийского Алатау, приведены на рисунке 23.

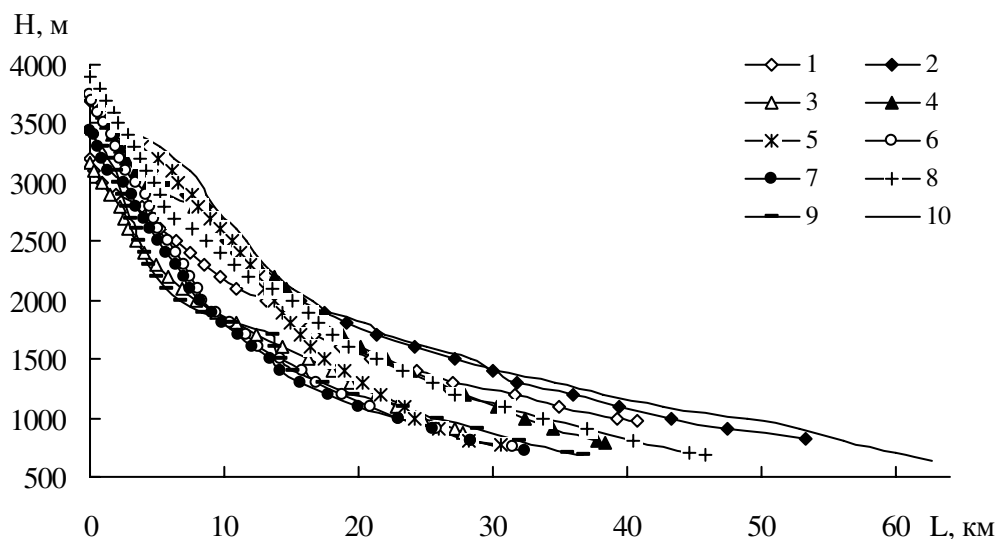


Рис. 23. Продольные профили основных рек северного склона Заилийского Алатау от истоков до подошв конусов выноса.

1 – Каракастек, 2 – Узункаргалы, 3 – Чемолган, 4 – Каскелен, 5 – Аксай,
6 – Большая Алматинка, 7 – Малая Алматинка, 8 – Талгар, 9 – Иссык,
10 – Тургень.

На суше существует три яруса накопления наносов [93]. 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 селеформирования, поэтому этот ярус классифицируют как зону формирования [151], питания и селеформирования [144]. 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) [144], зону затухания или разгрузки селя [151].

Часть селевого бассейна – горную долину, расположенную между описанными ярусами накопления наносов, называют транзитной зоной или зоной движения селя [144, 151]. 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 межселевой период в виде оползней, осыпей и т.д. Вода (грунтовая, поровая, боковых притоков) играет важную роль во время прохождения селя, поскольку она может принимать участие в селевом процессе: способствует либо частичному распаду селевых смесей, вызывая разжижение селевого потока, либо увеличению их расхода и объема путем набора рыхлообломочного материала.

2.1. Стартовая зона

Основными поставщиками рыхлообломочного материала на верхний ярус накопления наносов северного склона Заилийского Алатау являются ледники [141]. Наиболее мощные морены, сохранившиеся до настоящего времени, образовались в среднем и верхнем плейстоцене. Эти морены расположены в диапазоне высот 1700–3000 м. Их верхняя часть перекрывается современными моренами. Нижняя, 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. Малая Алматинка (рис. 24). Рыхлообломочный материал со склонов перемещается к осевой части троговой долины в ходе маломасштабных селевых процессов. При этом образуются шлейфы небольших по объему пролювиаль-

ных конусов выноса. Периферийные части этих конусов выноса достигают русла р. Малая Алматинка и размываются ее водами.



Рис. 24. Верховье троговой долины р. Малая Алматинка.
Снимок сделан с современной морены ледника Туяксу (фото автора).

В бассейне р. Малая Алматинка наибольший вынос наносов может иметь место при селеформировании на морене ледника Маншук Маметовой, примыкающей к главной троговой долине с востока. Эта морена имеет такие протяженность и уклон, что на ней могут формироваться мощные сели с выраженной пластичностью селевой массы. Отложения распавшихся селевых смесей, а также рыхлообломочный материал, слагающий малые боковые конусы выноса, примыкающие к троговой долине, выносятся мощными селями на средний ярус накопления.

Твердая составляющая селевых потоков, формирующихся на современных моренах, отлагается, как правило, в верхней части троговой долины. Практически полное отсутствие глинистых фракций в составе современных морен исключает возможность проявления свойства пластичности у селевых смесей, образующихся в результате взаимодействия водных потоков с рыхлообломочным материалом. Поэтому, несмотря на большой расход потоков, образующихся при прорыве моренных озер и внутриледниковых водоемов, при их выходе в троговую долину происходит частичный распад селевой массы, сопровождающийся отложением ее твердой составляющей (рис. 25, 26). Селевой процесс затухает и вновь активизируется лишь в той части троговой долины, где морена верхнечетвертичного возраста на большом протяжении имеет значительный уклон (рис. 27).



Рис. 25. Распад и отложение селевой массы в верхней части троговой долины р. Кумбель (сель 1977 г.). В центральной части фотографии – суспензия, излившаяся из порового пространства крупных фракций селевой массы.

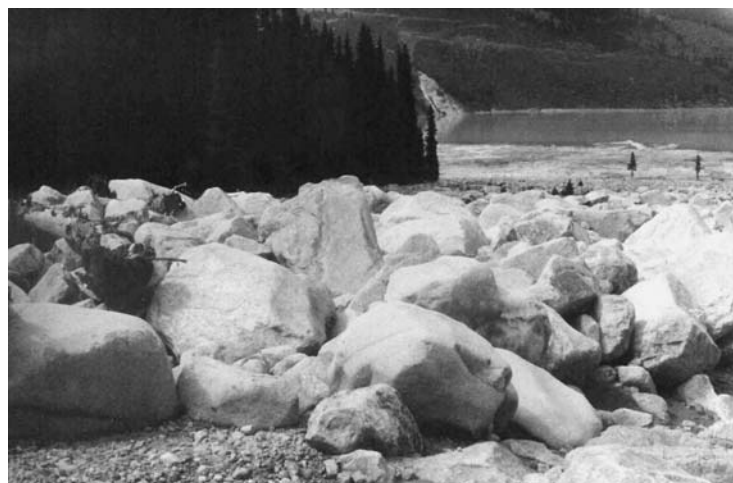


Рис. 26. Отложения крупных фракций селя 1994 г. на р. Озерная. При малом содержании пылевато-глинистых фракций из порового пространства валунов и глыб вытекают не только суспензия, но и частицы размером до 200 мм. Такие отложения часто принимают за отложения водокаменных селей (фото А.Х. Хайдарова).

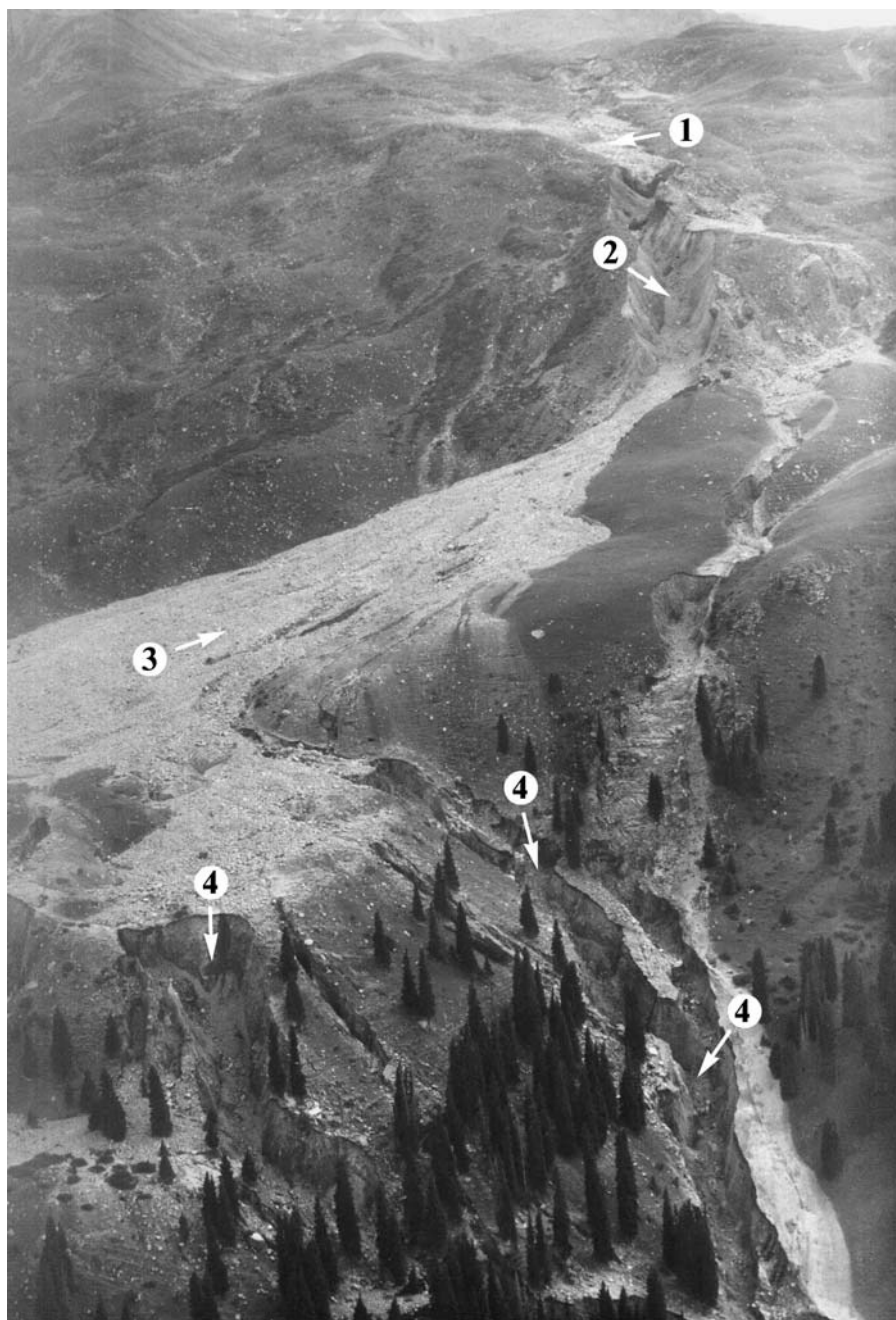


Рис. 27. Верхнечетвертичная морена в верховьях р. Каскелен. В верхней части фотографии видны отложения крупных фракций селя, сформировавшегося на современной морене (1). Движение суспензии, излившейся из крупных

фракций, по крутому уступу верхнечетвертичной морены привело к формированию вреза (2). Из-за относительно небольшой длины вреза (200–300 м) селевая смесь при выходе на пологий участок морены (3) распалась. Суспензия, продолжая движение по крутым участкам морены, образовала серию врезов (4), образовавшаяся при этом селевая смесь имела плотность близкую к $2350\text{--}2400\text{ кг/м}^3$. После слияния селевой смеси с водой р. Каскелен, образовавшийся поток продолжал движение. «Окончательно селевая масса отложила на широком участке долины реки ниже г. Каскелен» [72].

В системе рытвин (рис. 28) возможно зарождение селей дождевого генезиса в результате сдвига водонасыщенных пород. Обводнение рыхлообломочных пород происходит при выпадении ливневых жидких осадков, когда подземные каналы стока не обеспечивают безнапорное движение воды.



Рис. 28. Система рытвин в верховьях р. Кумбель, в которых зарождались мощные сели дождевого генезиса.

На рисунке 29 начала продольных профилей привязаны к единой высотной отметке (3400 м). Это не совсем правильно, так как истоки рек находятся на различных, хотя и отличающихся незначительно высотах. Но, с другой сторо-

ны, появляется возможность визуальной сравнительной оценки уклонов верхних ярусов накопления наносов и зон формирования селей. Из рисунка 29 видно, что наибольший уклон селеформирующей зоны (2200–3400 м) принадлежит бассейнам рек Иссык, Малая и Большая Алматинки, наименьший – Тургень, Аксай. Разница в уклонах существенна: уклоны селеформирующих зон отличаются практически в два раза.

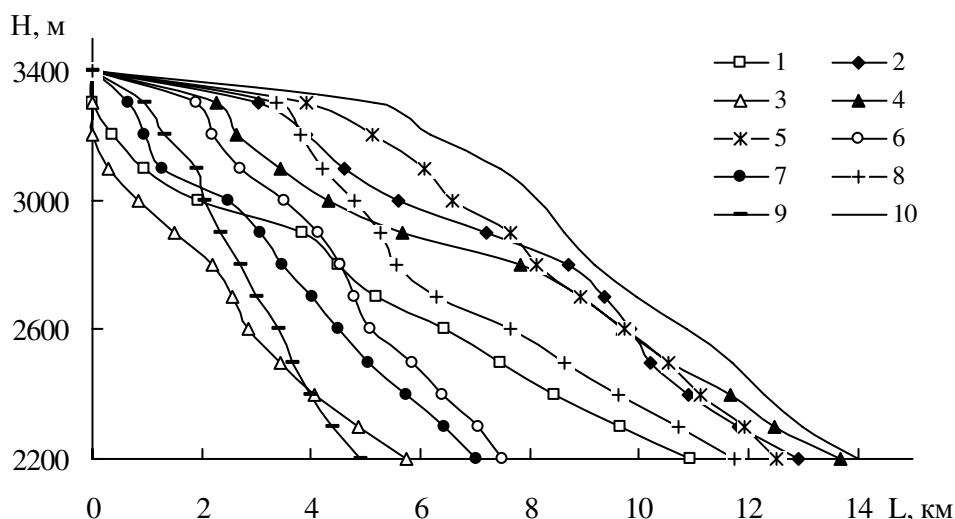


Рис. 29. Продольные профили селеформирующей зоны.

1 – Каракастек, 2 – Узункаргалы, 3 – Чемолган, 4 – Каскелен, 5 – Аксай,
6 – Большая Алматинка, 7 – Малая Алматинка, 8 – Талгар, 9 – Иссык,
10 – Тургень.

Известно, что интенсивность вовлечения рыхлообломочного материала в процесс селеформирования (эрозионно-сдвиговый селевой процесс) пропорциональна уклону селеформирующей зоны [121], поэтому сели в бассейне р. Иссык очень быстро достигают плотности, которая позволяет им беспрепятственно перемещаться в промежуточной зоне. Из сказанного следует, что уклон селеформирующих зон оказывает существенное влияние на объем конусов выноса, расположенных на предгорной равнине. Это необходимо учитывать при моделировании конусообразования.

2.2. Промежуточная зона

Промежуточная (транзитная [144, 151]) зона селевых бассейнов северного склона Заилийского Алатау расположена преимущественно в высотном интер-

вале 1100–2200 м. Угол наклона этой зоны составляет 2–6°. Как правило, при подходе селя к промежуточной зоне селевая смесь имеет реологические свойства, позволяющие (при больших значениях расхода и объема селя) перемещаться селевой смеси до конуса выноса, расположенного в предгорной зоне, без остановки и частичного распада.

При наличии в промежуточной зоне рыхлообломочного материала движение селя сопровождается обогащением твердой составляющей и водой, поступившей из притоков и захваченной в русле, а также грунтовой водой, поступающей при углублении русла, поровой водой, попадающей в селевой поток вместе с рыхлообломочным материалом. При этом расход и объем селя могут значительно возрасти (рис. 30, 31, 32). В качестве примера может служить селя 1921 г. на р. Малая Алматинка. Русло реки от Медеу до южной окраины г. Верный было углублено на 10–12 м. Объем выноса русловых отложений составил 1–2 млн. м³ [50].



Рис. 30. Углубление русла р. Сарканд в промежуточной зоне, образованное селом 1982 г.

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 этот период расход и объем селей настолько малы, что отложение селевой массы происходит в пределах гор.



Рис. 31. Русло, образованное мощным селем в отложениях селевого конуса выноса. Конус выноса образован маломощными селями, двигавшимися перпендикулярно основной долине (фото А.Х. Хайдарова).



Рис. 32. Отложения селя в промежуточной зоне. 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.

Если расход селя небольшой (в широкой долине даже при относительно большом расходе), перемещение селевой массы происходит 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 (рис. 33). Толчком к остановке селя в промежуточной зоне могут служить также естественные и искусственные препятствия. Так, во время селя 1956 г. на р. Малая Алматинка в районе дома отдыха Совмина произошло массовое отложение крупных фракций, вызванное недостаточной пропускной способностью подмостового отверстия [30].



Рис. 33. Распластывание селя 1982 г. в широкой долине р. Сарканд. Присутствие обмазки на вертикальных поверхностях глыб, а также наличие поверхностных трещин на селевой смеси свидетельствует о ее высокой плотности (фото В.Е. Сербо).

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 смеси. Основная масса селя 1977 г. отложилась на участке долины р. Большая Алматинка от устья р. Кумбель до устья р. Проходная [96]. На этом участке долины (длиной около 8 км) отложилось до 2,5 млн. м³ 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 (рис. 34), а близость коренных пород (на отдельных участках даже их выход на дневную поверхность) – об отсутствии систематических накоплений в промежуточных зонах.

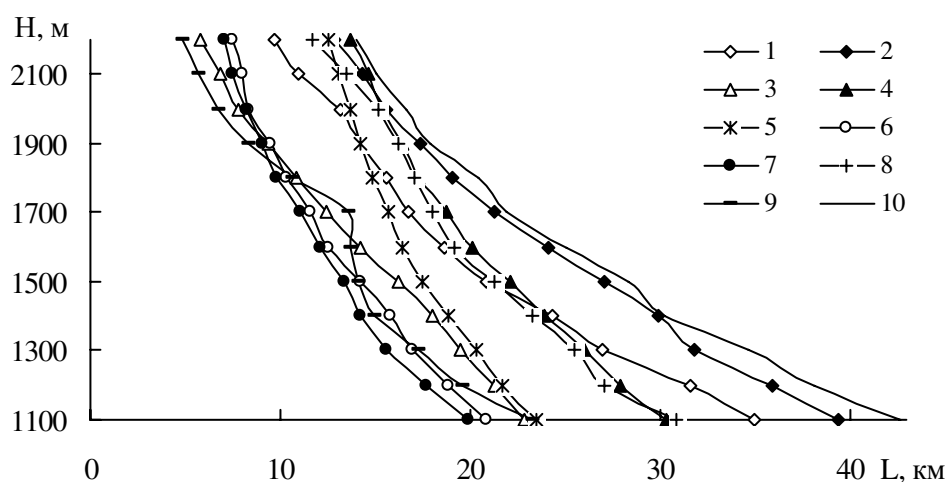


Рис. 34. Продольные профили промежуточной зоны.

1 – Каракастек, 2 – Узункаргалы, 3 – Чемолган, 4 – Каскелен, 5 – Аксай,
6 – Большая Алматинка, 7 – Малая Алматинка, 8 – Талгар, 9 – Иссык,
10 – Тургенъ.

На рисунке 34 изображены продольные профили промежуточной зоны основных рек северного склона Заилийского 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 Узункаргалы и Тургенъ, их среднее значение – около $2,5^\circ$. Максимальный уклон наблюдается в бассейне р. Аксай – около 6° . Нети-

пичная форма продольного профиля обсуждаемой зоны р. Иссык – следствие образования завальной плотины и заполнения естественного селехранилища наносами. Относительное увеличение уклона промежуточных зон в верхней их трети часто объясняется выходом коренных пород.

Мощность отложений наносов в промежуточных зонах незначительна и не превышает, как правило, первых десятков метров. Учитывая, что разность высот между началом и концом промежуточных зон составляет 1100–1200 м, можно утверждать: отложения наносов практически не влияют на форму продольных профилей промежуточных зон селевых бассейнов северного склона Заилийского Алатау. Длина промежуточной зоны определяется особенностями рельефа селевых бассейнов и для данного района изменяется от 10 до 31 км.

2.3. Зона разгрузки

Как правило, зона разгрузки 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 [153].

Конус выноса – элемент селевого бассейна и является продуктом его деятельности. Морфометрические характеристики конусов выноса зависят от повторяемости и масштаба селепроявлений, которые определяются орографией бассейна, характеристиками поверхностей стокообразования, осадками, площадью оледенения, минералогическим и гранулометрическим составами селеформирующих грунтов [130, 131]. Конусы выноса Северного Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау сложены в основном селевыми отложениями (эоловые и аллювиальные отложения играют второстепенную роль) (рис. 35, 36), имеют характерную конусообразную форму и приурочены к месту выхода селей в более широкую долину или на предгорную равнину.

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 слож-

но. Эта граница может быть получена путем экстраполяции линии раздела в той части соприкасающихся конусов, 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 [65].

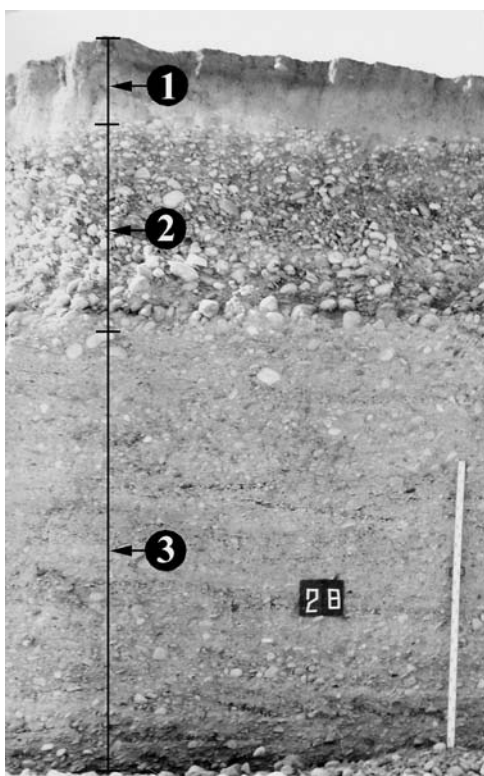


Рис. 35. Эоловые (1), аллювиальные (2) и селевые (3) отложения, вскрытые в результате эрозионной деятельности селей на конусе выноса р. Сарканд (длина рейки 3 м) (фото А.Х. Хайдарова).

Конусы выноса, расположенные в предгорной зоне северного склона Заилийского Алатау, сложены 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 (рис. 37), а также валунов и глыб, размеры которых превышают 0,5 м (см. рис. 36).

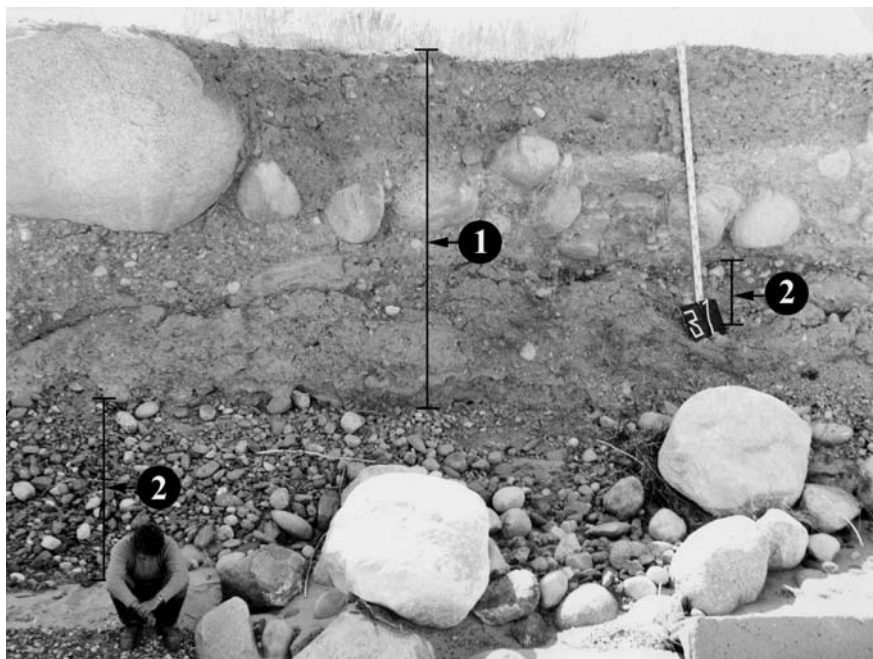


Рис. 36. Разрез отложений конуса выноса р. Сарканд (в приповерхностном слое). Переменение селевых (1) и аллювиальных (2) отложений (фото А.Х. Хайдарова).

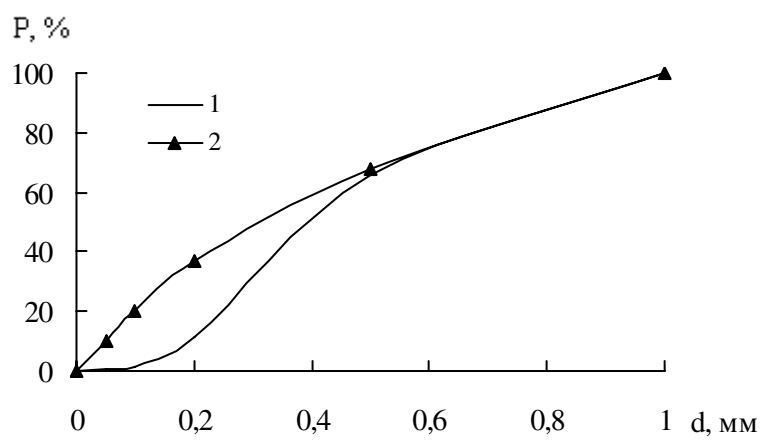


Рис. 37. Гранулометрический состав мелкозема аллювиальных (1) и селевых (2) отложений. Конус выноса р. Малая Алматинка.

Конусы выноса в той или иной степени перекрыты лессом. В западной части хребта мощность лесса максимальна. Наличие промоин в лессовом покрове конусов выноса затрудняет их выделение на карте. Примером может служить конус выноса р. Узункаргалы (рис. 38). Правая (орографически) часть его перекрыта лессом, мощность отложений 20–25 м. Мощность лессового покрова ($H_{\text{л}}$) на конусе выноса можно оценить по размаху извилин горизонталей

$$H_{\text{л}} = \frac{lh}{L},$$

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

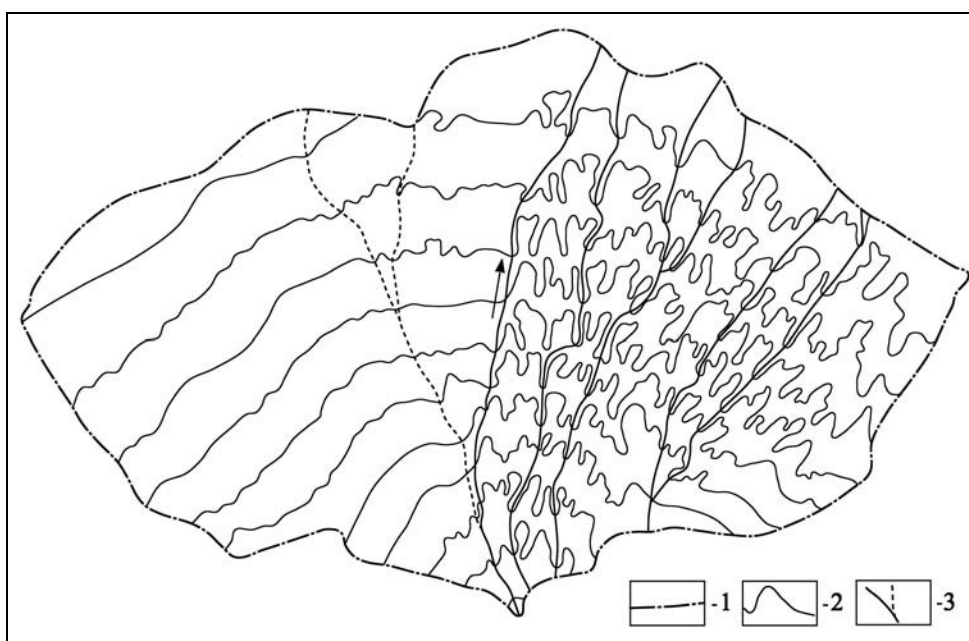


Рис. 38. Конус выноса р. Узункаргалы.

1 – граница конуса выноса, 2 – горизонталей, 3 – водотоки.

Встречаются ситуации, когда конус выноса одного генезиса расположен на поверхности конуса выноса другого генезиса. На рисунке 39 приведена 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 ок-

ружностей. Селевой конус выноса заканчивается заболоченными участками, выходом родников, его уклон к периферии уменьшается и принимает значение уклона предгорной равнины, примыкающей к подошве конуса, форма горизонталей имеет небольшую кривизну.

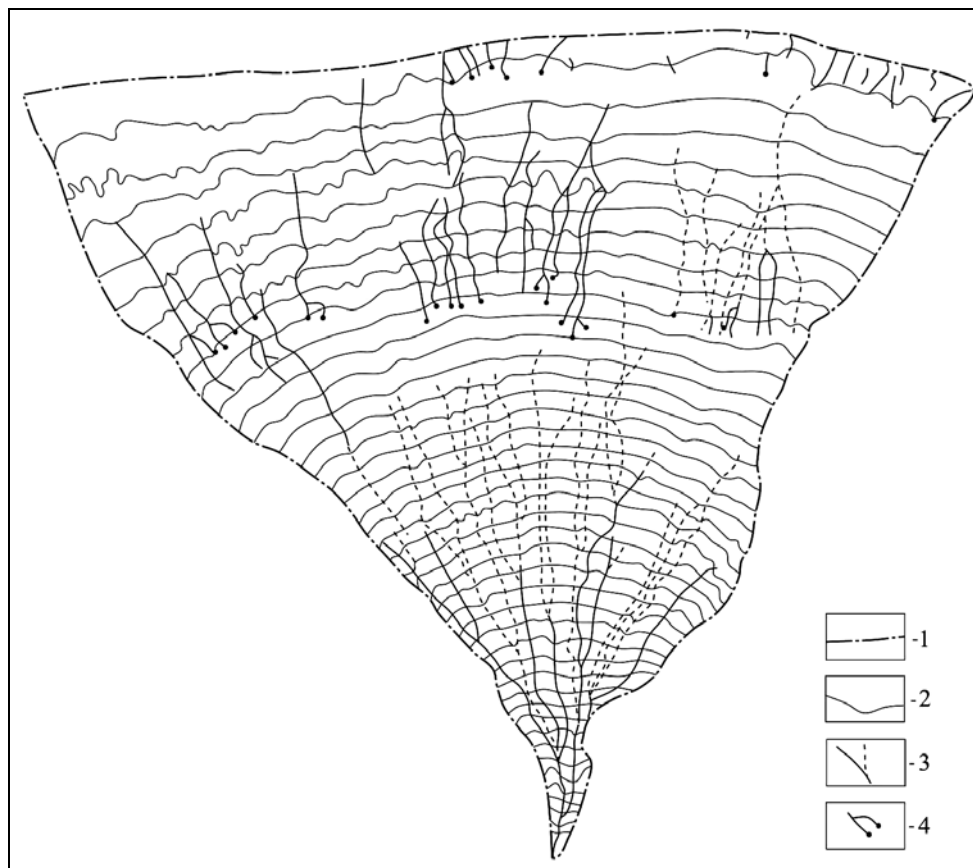


Рис. 39. Конус выноса р. Аксай (хр. Таласский Алатау).

1 – граница конуса выноса, 2 – горизонталы, 3 – водотоки, 4 – родники.

Экспериментальное изучение механизмов формирования конусов выноса аллювиального и селевого генезисов показало, что они значительно отличаются. На топографических картах это отличие проявляется в форме горизонталей периферийной части конусов выноса. Периферийные горизонталы аллювиального конуса выноса имеют форму, близкую к дуге окружности, а селевого конуса выноса – почти прямой линии или дуги окружности с отрицательной кривизной [162].

В качестве дешифрирующего признака, позволяющего отличить конусы выноса, сложенные аллювиальными отложениями, от конусов выноса, образованных селевыми отложениями, может служить густота речной сети. Однако определять густоту речной сети традиционным способом, т.е. включать в сумму длин все водотоки (наряду с естественными водотоками и длины каналов, и канав) в данном случае нельзя, так как количество водотоков, наряду с другими признаками, является дешифрирующим признаком.

Оценить густоту речной сети на конусах выноса предгорной зоны по топографической карте сложно, так как невозможно отличить ирригационную сеть от естественных водотоков. Для оценки этой характеристики нужно воспользоваться аэрофотоснимками, сделанными в период, когда реки многоводны. На селевых конусах выноса образуется, как правило, одно крупное относительно глубокое русло, которое иногда на периферии конуса выноса разделяется на многочисленные рукава (например, конусы выноса рек Талгар, Иссык, Тургенъ). Если исходить из того, что на селевых конусах выноса имеется по одному руслу, то густота речной сети составляет в среднем $0,2 \text{ км/км}^2$. На аллювиальных конусах выноса, как правило, русло реки разбивается на многочисленные рукава. Среднее значение густоты речной сети в несколько раз больше, чем среднее значение густоты речной сети селевого конуса выноса.

Конусы выноса селевых бассейнов северного склона Заилийского Алатау приурочены в основном к высотной зоне 780–1100 м. В этой зоне происходит отложение всех фракций твердой составляющей селевой смеси. Уклон этой зоны составляет $1\text{--}3^\circ$. Продольные профили конусов выноса приведены на рисунке 40. Из рисунка видно, что уклон конусов выноса рек Каракастек, Узункаргалы и Тургенъ значительно меньше уклона всех остальных, приведенных конусов выноса. Длина образующих конусов выноса изменяется от 5 до 18 км.

Профили конусов выноса в верхней части крутые, а на периферии – пологие. Верхняя часть конусов выноса сложена крупными фракциями, периферийная – более мелкими. Различие 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 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.

Значения площадей конусов выноса основных рек северного склона Заилийского Алатау изменяются в интервале $12\text{--}180 \text{ км}^2$. Более информативной характеристикой селевой деятельности бассейнов является объем конусов вы-

носа, поскольку при равных значениях их площадей уклоны конусов выноса могут отличаться (из-за различного минералогического и гранулометрического составов твердой составляющей селевой массы) [160]. За объем конуса выноса принимается объем фигуры, заключенной между дневной поверхностью конуса выноса и наклонной плоскостью (подстилающей поверхностью), проходящей через подошву конуса выноса [159]. При определении объема конуса выноса наибольшие трудности возникают при выборе угла наклона этой плоскости. В зависимости от величины угла наклона плоскости объем конусов выноса сильно изменяется. Поскольку данные о реальных значениях угла наклона обсуждаемой плоскости отсутствуют, средняя величина угла наклона была определена из следующих соображений.

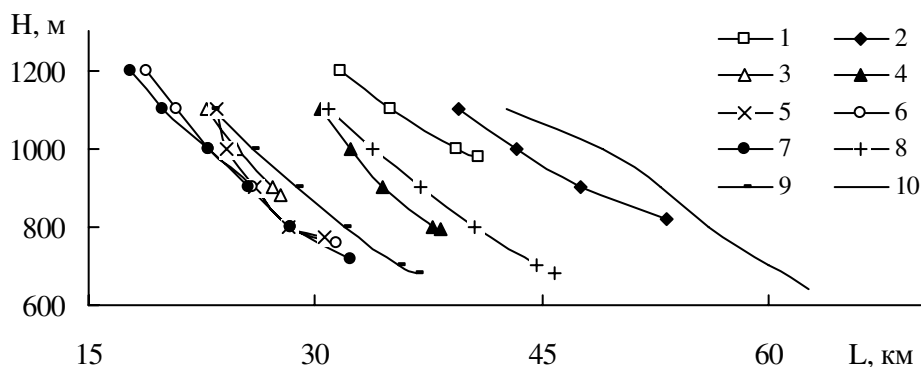


Рис. 40. Продольные профили конусов выноса.

1 – Каракастек, 2 – Узункаргалы, 3 – Чемолган, 4 – Каскелен, 5 – Аксай,
6 – Большая Алматинка, 7 – Малая Алматинка, 8 – Талгар, 9 – Иссык,
10 – Тургень.

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 Заилийского Алатау располагался пусть и относительно небольшой слаборасчлененный 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 Заилийского Алатау. Глинистые и пылевато-песчаные частицы уносились водными потоками за пределы конусов выноса и формировали предгорную равнину. Результаты

анализа картографического материала показали, что угол наклона предгорной равнины в северном направлении близок к $0^{\circ}30'$. Значение этого угла и было принято при определении объема конусов выноса северного склона Заилийского Алатау. Значения объемов конусов выноса изменяются в интервале 800–18 000 млн. м³.

Глава 3

ФАКТОРЫ СЕЛЕФОРМИРОВАНИЯ

Оценка роли факторов селеформирования необходима для выявления природы селевых явлений, условий селеобразования в различных регионах, их роли в условиях изменения климата, рельефа, геологической ситуации, антропогенного воздействия и т.д. Особенно она важна в палеоселеведении, когда эволюция селевой активности не может наблюдаться непосредственно, а также при прогнозировании изменения селевой активности в условиях изменяющегося климата.

Сель – многофакторный процесс. Основными селеформирующими факторами являются климатический, метеорологический, гидрологический, гидрогеологический, гляциологический, геоморфологический и геологический факторы. Роль основных селеформирующих факторов не равнозначна. На процесс формирования селей могут оказывать влияние и дополнительные факторы. Поскольку запасы селеформирующих пород в Заилийском Алатау почти не ограничены, а морфометрические характеристики зон селеформирования будут неизменными еще многие тысячи лет, то определяющим фактором селеформирования является климатический.

3.1. Климатический фактор

Климат является определяющим фактором многих природных явлений, носящих катастрофический характер. Влияние климата на стихийные явления в основном обусловлено изменением метеорологических элементов.

Влияние климатического фактора на селевые процессы в горных системах, где существовало или существует оледенение, проявляется не только вследствие изменения метеорологических элементов. Известно, что на протяжении четвертичного периода климат претерпевал значительные изменения. Среднегодовая температура воздуха в Антарктиде 146,2 тыс. лет назад опускалась на 9 °С, а 132,6 тыс. лет назад поднималась на 2,7 °С относительно современного значения [166]. Столь значительные изменения среднегодовых температур Антарктиды не могли не отразиться и на климате Заилийского Алатау. Свидетельством этому являются остатки

древних морен на высоте 1700–1800 м [31]. Если считать, что температурный градиент мало зависит от климата и принять его равным $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, то положение конечной морены ледника на высоте 1700–1800 м соответствует понижению температуры на 9–10 $^{\circ}\text{C}$ относительно современного значения. Эта величина хорошо согласуется с упомянутой выше среднегодовой температурой воздуха в Антарктиде. В результате геофизических исследований, выполненных в ходе Международного геофизического года, под ледником Туяксу были обнаружены рыхлообломочные отложения, мощность которых составляет более сотни метров [9]. Происхождение этих отложений можно объяснить либо образованием морен, либо отложением селей. И в том, и в другом случае столь мощная толща наносов могла образоваться, если оледенение в Заилийском Алатау практически исчезало. Для этого необходимо, чтобы климатическая снеговая линия поднималась на 300–400 м относительно ее современного положения. Такое возможно, когда температура воздуха повышается на 2–3 $^{\circ}\text{C}$. Именно на такую величину в Антарктиде повышалась температура в рисс-вюрмское межледниковье.

В период наступания ледников вероятность формирования селей гляциального генезиса мала, так как отсутствуют предпосылки для образования озер моренно-ледниковых комплексов. Известно, что период времени от зарождения озера до его опорожнения составляет около 50 лет. Температурные условия на леднике, благоприятные для возникновения и развития озера, имеются лишь в области максимального таяния. При наступании ледников эти области, с образующимися на них озерами, перемещаются к концу ледника быстрее, чем успевают развиться селеопасные озера. В этот период главную роль в выносе наносов играют сели дождевого генезиса. Однако и их масштабы сокращаются вследствие уменьшения стокообразующих площадей водосборов и уклонов областей формирования селей. Существенно изменяются и характеристики стокообразующих поверхностей.

При формировании селей дождевого генезиса участвует лишь та часть водосбора, где осадки выпадают в жидком виде. Если принять, что в условиях максимально холодного климата разница высот между концом ледника и верхней границей выпадения осадков в жидком виде была близка к современной, то площадь водосбора р. Малая Алматинка, где осадки выпадали в жидком виде, была меньше современного значения почти в 2 раза [155]. Вследствие этого значительно сокращалась длина речной сети водосбора, где концентрировался дождевой сток. И, что особенно важно для селеобразования, уклоны притоков, в которых могло происходить насыщение водных потоков рыхлообломочным материалом, при этом были значительно меньше.

Вероятность образования селеформирующих паводков снижалась и за счет изменения характеристик стокообразующих поверхностей, определяю-

щих возможность селеформирования. В условиях современного климата мощные сели дождевого генезиса образуются в результате выпадения осадков в жидком виде, в том числе и в зоне 3300–3800 м, представленной в основном скалами и склоновыми отложениями. Если коэффициент стока на скалах близок к единице, то на склоновых отложениях он зависит от физико-механических свойств отложений, наличия и характера растительного покрова, предварительного увлажнения. Коллювиальные отложения в высотной зоне 3000–3800 м, в условиях современного климата, обладают фильтрацией близкой к провальной. Благодаря этому создаются условия для накопления воды в толще рыхлообломочных пород.

Понижение климатической снеговой линии до 2400–2500 м (среднее значение, рассчитанное по формулам Варданянца и Гефера) приводило к тому, что стокообразующими поверхностями становились склоны, обладающие развитым почвенным покровом, что в корне меняет условия стокообразования. Наличие почвенного покрова препятствует накоплению влаги в нижележащей толще рыхлообломочных пород, уменьшая вероятность сдвиговых селевых явлений и, тем самым, возможность образования селей на относительно малых уклонах.

Результаты изучения строения конусов выноса северного склона Заилийского Алатау позволяют с большой степенью достоверности утверждать, что в течение ледниковых периодов вынос аллювия, а тем более селевых масс на конусы выноса, расположенные на предгорной равнине, практически не происходил [161]. Доказательством этому является наличие лесса на отложениях межледниковий [126, 157].

С потеплением климата, вследствие отступления ледников, создавались условия для образования моренных озер, прорыв которых приводил к формированию селей. В результате подъема климатической снеговой линии возрастала и вероятность формирования селей дождевого генезиса, поскольку соответственно смещалась верхняя граница зоны, ниже которой осадки выпадали в жидком виде, а также происходило увеличение стокообразующей площади водосбора.

Климат второй половины 20 века, с учетом того, что в середине предыдущего столетия закончился Малый ледниковый период (перестройка селеформирующих факторов, вследствие инерционности, занимает несколько десятилетий), был благоприятным для селевой деятельности. В настоящее время происходит почти повсеместное отступление ледников, сопровождающееся образованием западных, каровых и провальных озер. В то же время сток с ледников увеличивается, что приводит к переполнению озер и возрастанию вероятности их катастрофического прорыва.

Относительно благоприятными могут считаться условия и для образования селей дождевого генезиса в высокогорной зоне. При современном положении

климатической снеговой линии вероятность выпадения ливневых осадков в жидком виде в высокогорной зоне возросла до значений, при которых можно ожидать формирования мощных селей дождевого генезиса один раз в 50–100 лет в каждом из крупных селевых бассейнов.

Прогнозируемое потепление климата может существенно повлиять на селевую активность на северном склоне Заилийского Алатау. В соответствии с разработанными сценариями изменения климата в период до 2050–2075 гг., в горных районах южного и юго-восточного Казахстана ожидается более значительное повышение температуры воздуха, чем наблюдалось в 20 веке. Прогнозируемое повышение среднегодовой температуры воздуха лежит в пределах от 3,6 до 7,2 °С [90]. При увеличении температуры воздуха даже на 2 °С климатическая снеговая линия поднимется на 300–350 м. Это приведет почти к полному исчезновению каровых ледников и, следовательно, условий для образования озер карового типа. Размеры долинных ледников значительно сократятся, произойдет распад ледниковых систем. Несмотря на то, что площадь оледенения уменьшится, вероятность формирования и масштабы селевых явлений в ближайшие десятилетия, скорее всего, возрастут. Причиной тому станет увеличение числа селеопасных озер на ледниках, образующихся в результате распада оледенения, существующего в настоящее время [20].

Значительно возрастет вероятность формирования селей дождевого генезиса. Объясняется это тем, что в результате потепления вся высокогорная зона, характеризующаяся наибольшим средним уклоном и скоплением рыхлообломочных пород, окажется в зоне выпадения ливневых осадков в жидком виде. Провальная фильтрация, характерная для этих отложений, будет способствовать аккумуляции воды в рыхлой толще, создавая условия для реализации сдвиговых селевых процессов. Поскольку стокообразующие площади водосборов примут максимальные значения, а запасы рыхлообломочных пород в моренах почти не ограничены, характеристики селей дождевого генезиса будут иметь максимально возможные значения.

3.2. Метеорологический фактор

Исследование метеорологических условий, предшествовавших прохождению селей, показало, что основными из них являются интенсивность и продолжительность осадков, выпадающих в жидком виде в зоне селевых очагов. Предварительное увлажнение при возникновении селевых потоков не играет принципиальной роли, но в значительной степени определяет их характеристики.

Метеорологический фон накануне формирования селей дождевого генезиса часто обусловлен вторжениями с северо-запада и запада холодных воздушных масс. Подобная синоптическая ситуация предшествовала многим селям в Заилийском Алатау [47]. Известно, что выпадение осадков в Заилийском Алатау с апреля по август распределяется неравномерно по высотным зонам. Наименьшее количество осадков наблюдается в предгорной зоне, по мере поднятия в горы их количество увеличивается. В интервале высот 1400–1600 м выпадает максимум жидких осадков, а затем они уменьшаются [140]. Основной причиной изменения количества осадков с высотой местности является активизация атмосферных фронтов на склонах горных хребтов, а также усиление термической и динамической конвекции.

Распределение максимальных осадков по высотным зонам бассейна в значительной степени определяется положением нулевой изотермы (рис. 41) [36]. Известно, что при высоких положениях нулевой изотермы в высокогорной зоне создаются благоприятные условия для выпадения интенсивных и продолжительных осадков вследствие распространения конвекции на более мощную зону по вертикали [34, 35]. Особенности в распределении осадков внутри высотных зон можно объяснить различной экспозицией склонов и высотой ближайших хребтов [1, 60]. Больше всего осадков выпадает в центральной, наиболее высокой части хребта. К западу и востоку количество осадков уменьшается, что может быть объяснено понижением высоты гор. Во внутригодовом распределении месячных сумм осадков, за исключением высокогорной зоны, характерны два максимума (основной – весной и второстепенный – осенью). За три месяца (апрель, май, июнь) выпадает почти половина годового количества осадков. В высокогорье максимум осадков несколько сдвигается на более поздние месяцы [60].

Условием формирования мощных селей дождевого генезиса является выпадение осадков в жидком виде в высокогорной зоне. Установлено, что температура воздуха в день, предшествующий выпадению селеобразующих осадков, должна быть на высоте 3000 м не ниже 10 °С.

Зависимость между суточным слоем жидких осадков и селевыми проявлениями для Заилийского Алатау не установлена, что связано со сложностью процесса селеформирования и влиянием на него других факторов. Тем не менее, определение критических значений осадков, при которых селеформирование более вероятно, является одним из путей прогноза селей. Так, для формирования селей в центральной части Заилийского Алатау необходим суточный слой осадков более 35 мм, что обеспечивает 50 % вероятность превышения критического значения интенсивности выпадения жидких осадков. С увеличением слоя осадков (50 мм) вероятность составляет 65 % [60]. Для того чтобы селевой про-

цесс принял катастрофический характер, необходимо выпадение сильных осадков во всех высотных зонах бассейна.

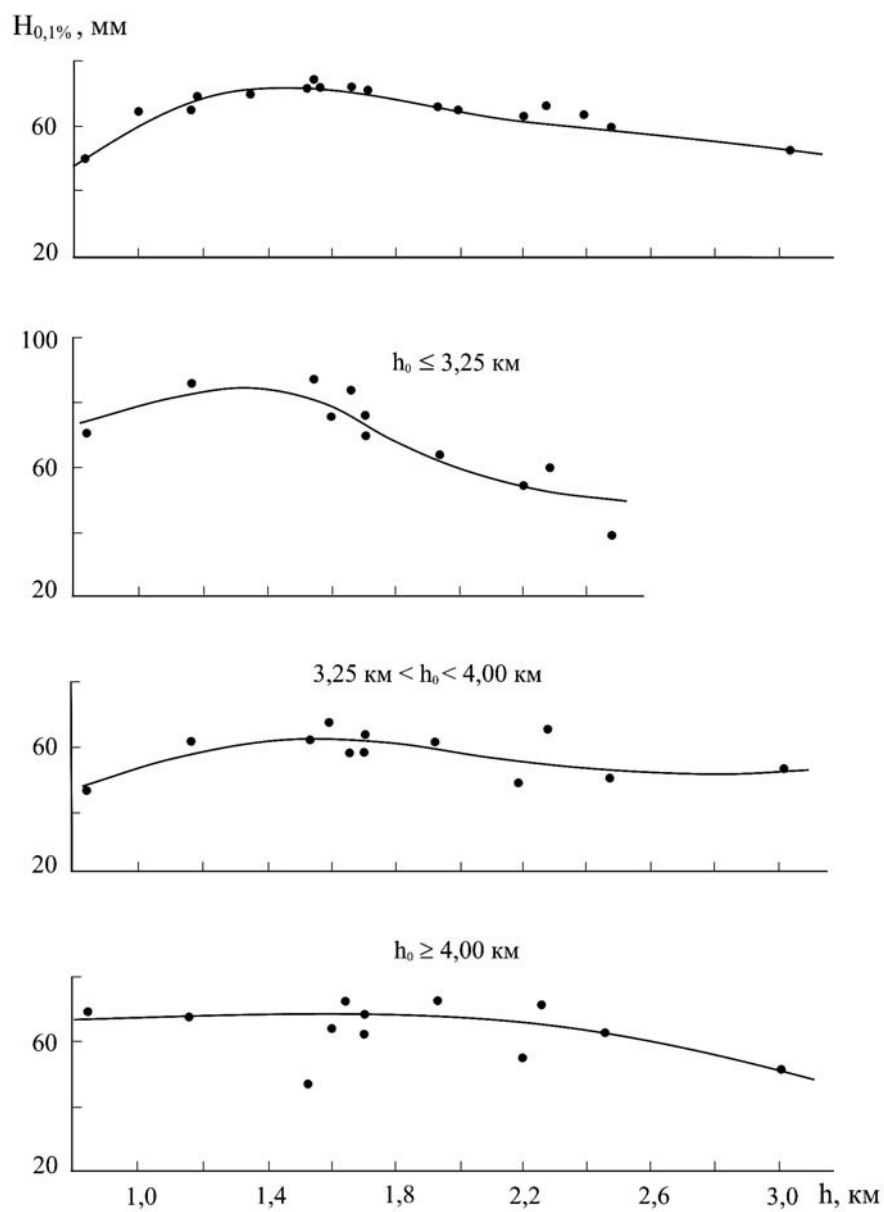


Рис. 41. Зависимости $H_{0,1\%} = f(h)$ для всей совокупности и для отдельных ее частей (при определенном положении нулевой изотермы).

Температура воздуха является одной из главных предпосылок образования селей как дождевого, так и гляциального генезисов. Критической (селеопасной) температурой в скально-ледниковом высокогорье, как показывают многолетние наблюдения, является среднесуточная температура воздуха 13–15 °С [44]. При таких температурах резко усиливаются процессы таяния ледников и снежников, активизируются термокарстовые процессы. Моренные озера могут создавать угрозу возникновения гляциального селя. На селеобразующие процессы гляциального генезиса большое влияние оказывают как значение температуры воздуха, так и продолжительность ее стояния. На северном склоне Заилийского Алатау за период 1951–1980 гг. наблюдалось 23 прорыва моренных озер. Сумма среднесуточных температур за 30 дней до прорыва в 88 % случаев была больше 212 °С [58].

Упомянутая температура благоприятствует и формированию селей дождевого генезиса. При температуре 13–15 °С и выше значительно увеличивается вероятность выпадения осадков в жидком виде в высотном интервале 3400–4000 м. Именно в этом высотном интервале, где углы залегания рыхлообломочных пород близки к углам естественного откоса, расположены очаги зарождения селей дождевого генезиса. Малая вероятность совпадения событий, когда вторжение воздушных масс происходит при температуре близкой к 13–15 °С, а воздух влагонасыщен и обуславливало редкую повторяемость катастрофических селей дождевого генезиса в условиях климата 20 века.

С целью оценки влияния метеорологических условий на селевую активность Т.С. Степановой было проведено сопоставление изменения температуры воздуха и сумм осадков с повторяемостью и мощностью селепроявлений. На рисунке 42 приведены графики изменения среднеиюльской температуры (кривая 1), аномалии глобальной температуры (кривая 2), среднегодовой температуры (кривая 3) по метеорологической станции Алматы и спектр относительно крупных селепроявлений на северном склоне Заилийского Алатау за последние 140 лет. Под глобальной температурой здесь понимается среднегодовая температура воздуха, осредненная по северному полушарию. На графиках приведены также тенденции изменения температуры в многолетнем разрезе.

Длина линий спектра селепроявлений соответствует следующим категориям селеопасности:

- длинная – I категория (объем выноса грязекаменной массы более 1 млн. м³);
- короткая – II категория (объем выноса от 100 тыс. м³ до 1 млн. м³).

Ширина линий характеризует генезис селей:

- тонкая – дождевые;
- толстая – гляциальные.

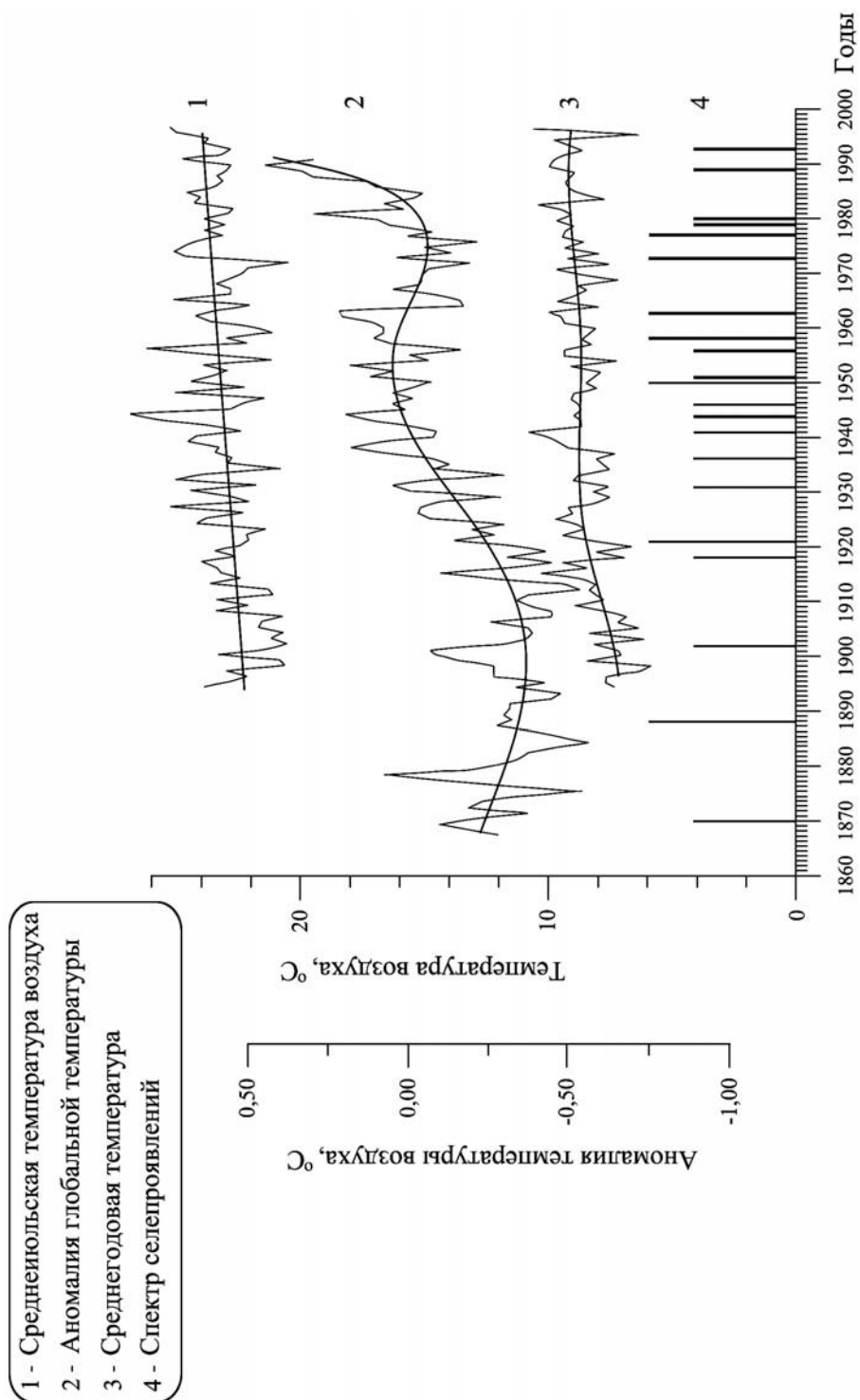


Рис. 42. Совмещенные графики температуры воздуха и спектр селепроявлений.

На рисунке 43 приведены графики сумм осадков за 1 год (кривая 1), за июль (кривая 2) по метеорологической станции Алматы и спектр селепроявлений. Из приведенных данных следует, что сели гляциального генезиса начали формироваться лишь после 1940 г., т.е. практически через 100 лет после окончания Малого ледникового периода. Их возникновение хорошо коррелируется с повышением глобальной температуры воздуха. Значительно меньшее влияние оказывает высокочастотное колебание температуры. Объясняется это тем, что образование и развитие селеопасных озер – процесс, занимающий несколько десятилетий. Момент прорыва таких озер определяется не столько текущими значениями метеорологических элементов, сколько характеристиками озерных перемычек и подземных каналов стока, состояние которых – результат воздействия многих факторов в течение длительного времени. Подтверждением этому является опорожнение ледникового озера в бассейне р. Сарканд осенью 1982 г., т.е. тогда, когда систематические наблюдения за состоянием озер на моренно-ледниковых комплексах (из-за малой вероятности их прорыва) завершаются.

Незначительное увеличение среднесуточной температуры воздуха в первой декаде сентября привело к обрушению ледяного свода, перекрывшего канал стока, и накоплению дополнительного объема воды в озере Акколь. Под воздействием гидростатического и термического факторов 8 сентября 1982 г. произошел прорыв озера в результате чего сформировался сель. Сель не был катастрофическим только потому, что опорожнение произошло частично: озеро Акколь опорожнилось лишь на 25 %. В озерной котловине осталось более 1 млн. м³ воды [139]. Человеческих жертв при прохождении селя удалось избежать благодаря оперативному оповещению пограничниками администрации г. Сарканд.

Влияние осадков на формирование селей гляциального генезиса также незначительно, хотя имеется связь селевых явлений с низкими значениями сумм осадков в июле и относительно высокими значениями среднеиюльской температуры воздуха. Такая метеорологическая ситуация благоприятна для интенсивного таяния льда и снега и, следовательно, заполнения водой емкостей моренно-ледниковых комплексов. Просматривается слабая связь селей дождевого генезиса с температурой воздуха и суммой осадков за год и относительно высокая – селей дождевого генезиса с суммой осадков за июль. Приведенные данные свидетельствуют о том, что в условиях климата 20 века катастрофические сели дождевого генезиса имели место при исключительно благоприятном (для селеформирования) сочетании температуры воздуха и осадков.

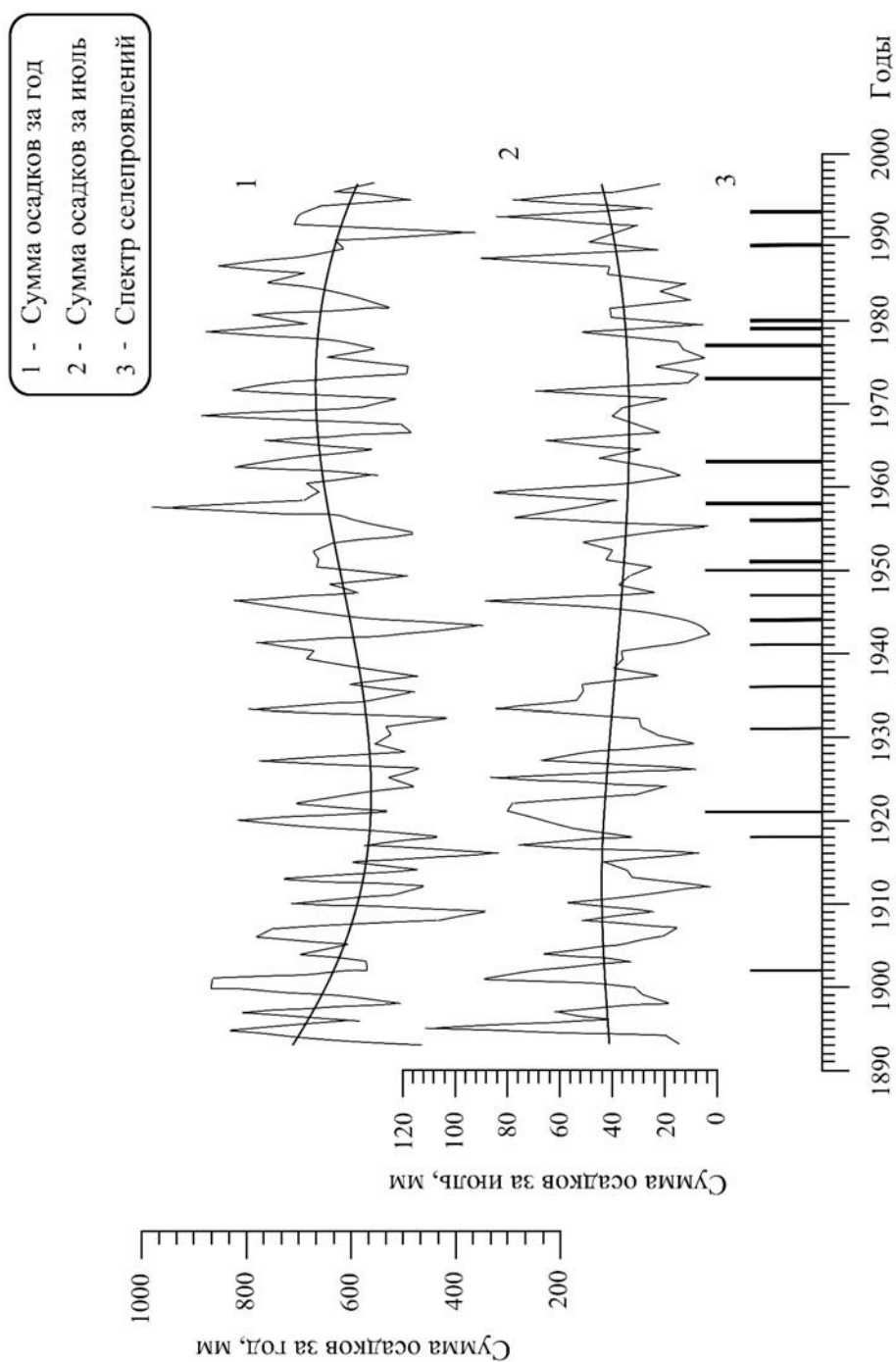


Рис. 43. Совмещенные графики сумм осадков и спектр селепровавлений.

3.3. Гидрологический и гидрогеологический факторы

Фактором, лимитирующим повторяемость и масштабы селей в Заилийском Алатау, является вода – главный компонент селевого потока. За счет энергии водного потока происходит размыв и вовлечение рыхлообломочных пород в движение, взвешивание и перемешивание частиц различного размера твердой составляющей селевой массы. Взаимодействие воды с глинистыми частицами и гумусом придает селевой массе свойство пластичности. На частицы, погруженные в воду, действует архимедова сила, что значительно уменьшает трение. Наличие воды в толще рыхлообломочных пород увеличивает сдвигающую силу, что при определенных условиях может инициировать оползни, трансформирующиеся в сели.

Паводки формируются в результате выпадения интенсивных и продолжительных дождей, таяния снежного покрова, катастрофического прорыва моренных озер и внутриледниковых водоемов, водохранилищ, накопителей сточных вод и т.д. Важная роль в формировании выдающихся паводков на реках северного склона Заилийского Алатау принадлежит подземному стоку. При этом существенное значение имеет предварительное увлажнение почвогрунтов, образующееся, в том числе, и за счет таяния пятен снега при выпадении на них теплых дождей. Наиболее благоприятные условия для формирования дождевых паводков создаются при выпадении продолжительных и интенсивных дождей, когда подземный и подпертый поверхностный сток увеличиваются за счет прогрессирующего роста стокообразующей площади водосбора [69].

Для образования селей на эродированных водосборах (очаги рассредоточенного селеобразования Акжар и Кокчека), поверхностный слой которых представлен толщей рыхлообломочных пород, образовавшейся в результате сейсмического воздействия на коренные породы, достаточно выпадения ливневых дождей.

Если почвогрунты речных бассейнов обладают высокими водопоглотительными свойствами (сплошная задернованность, небольшое содержание в верхнем слое пылевато-глинистых фракций), выпадение ливневого дождя может оказаться недостаточным для формирования большого паводка. В таких условиях необходимо сильное предварительное увлажнение.

Наиболее благоприятные условия для образования сильного предварительного увлажнения создаются, по мнению А.Ф. Литовченко [69], при выпадении серии ежедневно наблюдающихся кратковременных дождей (групповых осадков). Суммарный слой таких дождей может существенно превысить месячную норму осадков. Именно групповые осадки формируют большие паводки на реках северного склона Заилийского Алатау. Слой групповых осад-

ков зависит от высоты местности и изменяется во времени. На рисунке 44, заимствованном из [69], показано положение максимума слоя групповых осадков 1 % обеспеченности. То обстоятельство, что максимум групповых осадков в высокогорной зоне приходится на июль-август – период наиболее вероятного выпадения осадков в жидком виде и повышенного стока из ледниковой зоны, является причиной того, что большинство катастрофических селей дождевого генезиса в описываемом регионе сформировались в июле-августе.

Катастрофические сели в Заилийском Алатау практически не формируются в среднегорной зоне. Главной причиной является перехват осадков древесной, кустарниковой и травянистой растительностью. По данным А.Ф. Литовченко [70], лиственные деревья 25–26-летнего возраста задерживают от 10 до 65 % осадков. Перехват осадков тьянь-шаньской елью (ель Шренка) достигает 70–72 %, кустарниковой и травянистой растительностью значительно меньше, чем древесной растительностью.

Роль гидрогеологического фактора в селевом процессе, по мнению А.И. Шеко, определяется степенью влияния инфильтрации и фильтрации почвогрунтов на поверхностный и подземный сток, влиянием подземных вод на геологические процессы, формирующие твердую составляющую селей.

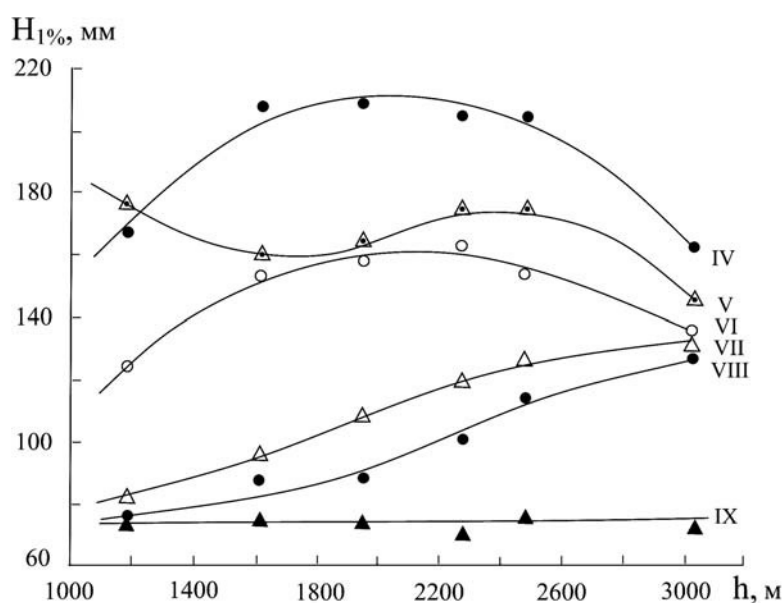


Рис. 44. Высотное распределение слоя групповых осадков 1 % обеспеченности за отдельные месяцы в бассейне р. Малая Алматинка.

Инфильтрационные и фильтрационные свойства почвогрунтов зависят от их гранулометрического состава, минерального состава глинистых фракций, влажности пород, характера растительного покрова. Наиболее резкая смена фильтрационных свойств имеет место на контакте рыхлообломочных и коренных пород. В нивальном поясе дождевые и талые воды проникают только на глубину оттаивания мерзлых пород, которая определяется температурным фоном, ориентацией склонов, наличием растительности, гранулометрическим и минералогическим составами пород [37, 38, 110].

Степень насыщения почвогрунтов подземными водами может быть очень высокой. Так, например, в формировании катастрофического селя 1973 г. на р. Малая Алматинка, возникшего в результате прорыва моренного озера (объем паводка – 225 тыс. м³), приняло участие 455 тыс. м³ поровой воды, поступившей в селевой поток вместе с рыхлообломочными породами в ходе углубления русла [24]. Наличие больших объемов грунтовых вод приводило к тому, что даже через сутки после окончания селевого процесса в прирусловой области имели место оползни с объемом до 100 тыс. м³, трансформировавшиеся в сели с плотностью более 2300 кг/м³ [121, 137].

3.4. Гляциологический фактор

Сели гляциального генезиса формируются в результате взаимодействия водных потоков с рыхлообломочными породами, представленными в основном моренными отложениями, а также при разжижении оползневых масс, образующихся при нарушении устойчивости фронтальных уступов морен. Водные потоки образуются в результате катастрофического опорожнения озер моренно-ледниковых комплексов и внутриледниковых водоемов, а также в результате выпадения жидких осадков на поверхность ледников. Опорожнение водоемов происходит путем перелива воды через озерные перемычки или по каналам, формирующимся в моренно-ледниковых комплексах. Наиболее катастрофические размеры гляциальные сели Заилийского Алатау приобретают при опорожении озер путем размыва озерных перемычек, сложенных оттаявшими моренными отложениями (бассейны рек Малая Алматинка (1973 г.), Кумбель (1977 г.)), а также при прорыве озер через гроты и туннели, неоднократно участвовавших в опорожении водоемов и, как следствие, имеющих большие площади сечений водоводов (бассейн р. Иссык, 1958, 1963, 1977 гг.) [77, 78, 91, 152].

В настоящее время в Заилийском Алатау насчитывается более 100 моренных и ледниковых озер, представляющих селевую опасность [4]. В основном они возникли после 40-х годов на языках ледников, опускавшихся до высоты 3300–3400 м. В настоящее время озера формируются на высотах 3500–3600 м.

Если в середине 60-х годов на северном склоне Заилийского Алатау насчитывалось 10 приледниковых озер с объемом более 10 тыс. м³, а в 1980 г. их было уже 41, то к 1990 г. их стало 60 [20]. Котловины приледниковых озер интенсивно развиваются, прирост их объема может достигать 20–30 % в год. Так, объем озера Богатырь с середины 60-х годов по 1985 г. увеличился на 5–6 млн. м³ [4]. О темпах увеличения количества прорывов озер в Заилийском Алатау можно судить по рисунку 45 [99]. Известно, что к числу озер с повышенной селевой опасностью в 90-х годах 20 столетия относилось 37 моренных озер.

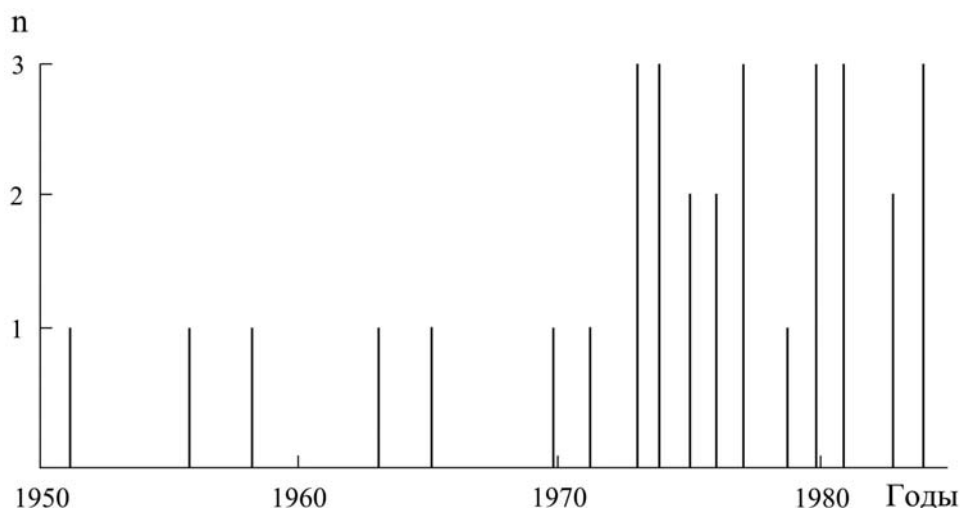


Рис. 45. Рост количества прорывов озер (n) в Заилийском Алатау.

Объем и расход селей в значительной степени определяются объемом водоемов моренно-ледниковых комплексов, участвующих в селевых процессах. В свою очередь объемы водоемов зависят от размеров и характера оледенения селевых бассейнов. По генезису моренные озера, расположенные на современных моренах, можно разделить (по В.А. Керемкулову [57]) на западинные, термокарстовые, каровые и подпруженные мореной. Для северного склона Заилийского Алатау опасность представляют западинные и каровые озера. Западинные озера образуются, как правило, на ледниках долинного, реже – котловинного типов. Наибольшие объемы имеют западинные озера, возникающие при заполнении водой замкнутых понижений на поверхности морен между открытой частью ледника и фронтальным уступом морены. Котловины западинных озер образуются в результате неравномерного таяния открытого и погребенного льда, а также термокарстовых процессов. Образование озер западинного типа начинается тогда, когда открытая поверхность ледника попадает в благоприятную климатическую

зону. Условия, благоприятные для образования западных озер, создаются при отступании ледников и понижении их поверхности за счет стаивания. Сток из озер осуществляется поверхностным (внутриморенным) путем. Озерные перемычки могут слагаться рыхлообломочными отложениями, мерзлой брекчией или льдом. Объем западных озер определяется их положением в пространстве, стадией развития, климатическими условиями и т.д. (рис. 46) [57].

Первые сведения об озере № 6 на леднике Маншук Маметовой появились в 50-х годах 20 века. В 1958 г. оно имело размеры 70 м на 25 м. Реальную опасность, как потенциального фактора селеформирования, оно стало представлять в 70-х годах, когда его объем составлял 43 тыс. м³ [4]. До настоящего времени, несмотря на попытки его опорожнения, озеро остается селеопасным, его объем в настоящее время – более 200 тыс. м³.



Рис. 46. Западинное озеро на леднике Маншук Маметовой
(фото Б.С. Степанова).

В зрелой стадии западные озера могут иметь длину до 2000 м, ширину до 600 м, аккумулировать до 10 млн. м³ воды (озеро Богатырь, хребет Заилийский Алатау). Западные озера развиваются относительно медленно. Формирование условий для возникновения и развития озер происходит в течение многих десятков лет. Так, например, период между началом формирования и прорывом озера на леднике Туюксу составил около 50 лет. Возникновение озера, прорыв которого в 1973 г. привел к катастрофическому селу в бассейне р. Малая Алматинка, отмечено Н.Н. Пальговым в 1922 г. Изменение объема

озера во времени иллюстрируется рисунком 47 [22]. Развитие озера завершилось катастрофическим прорывом в 1973 г. [24].

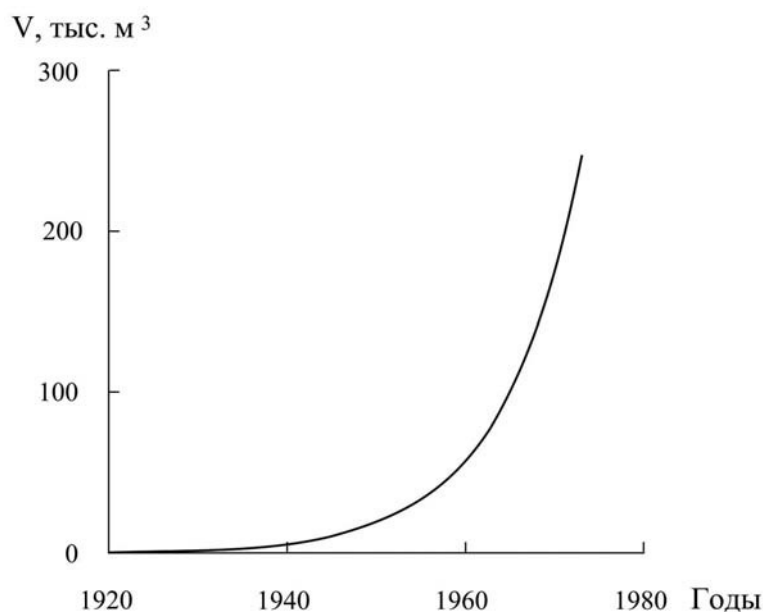


Рис. 47. Изменение объема озера № 2 на языке ледника Туяксу.

Каровые озера имеют иной механизм формирования. Они зарождаются при заполнении водой чашеобразных углублений в коренных породах, образующихся на дне каров в результате эрозионного воздействия ледников. Заполнение водой таких котловин в отсутствии оледенения не представляет опасности, так как вероятность разрушения перемычки мала. Ситуация качественно изменяется, когда в ходе отступления каровых ледников в качестве перемычек озерных котловин выступают оторвавшиеся, забронированные мореной, языки ледников. Объемы котловин, в которых образуются каровые озера, достигают сотен тысяч кубометров. Как правило, каровые котловины, из-за наличия внутри-моренных каналов, водой не заполняются. Образование озер связано с нарушением нормального режима стока. Заполнение котловин водой и их прорыв происходят обычно в течение одного сезона. Расход прорывных паводков определяется возможностями каналов и, при многократном их функционировании в прорывном режиме, достигает десятков – первых сотен кубометров в секунду [22]. Заполнение котловин возможно и за счет воды, образующейся в результате таяния снега, накопившегося на прилегающих склонах в зимний период, т.е. задолго до начала таяния ледников (бассейн р. Средний Талгар, 1993 г.).

3.5. Геологический фактор

Формирование Заилийского Алатау, отличающегося интенсивной селевой деятельностью, связано с тектоническими движениями, начало которых относят к концу неогена – началу антропогена. Движениями этого времени, а также более поздних хронологических этапов, в совокупности с денудацией, был создан контрастный высокогорный рельеф с его сложной вертикальной зональностью и многоступенчатым строением [48]. В четвертичной тектонике хребта важную роль сыграли крупные разрывные нарушения, сопровождаемые глыбовыми перемещениями и ярусным заложением разломов, отделяющих низкогорье от среднегорья. К этим ослабленным зонам приурочен ряд современных очагов рассредоточенного селеобразования. Наиболее активные очаги связаны с узлами пересечения тектонических нарушений [75]. Например, к одному из таких узлов приурочен Акжарский обвал в бассейне р. Аксай. Процесс непрерывного восходящего движения хребта сопровождается сейсмическими проявлениями различной степени интенсивности, что вызывает сейсмогенные склоновые деформации, способствующие массовому сходу оползней и оплывин, нередко трансформирующихся в грязекаменные потоки. Такие потоки наблюдались в результате Верненского землетрясения 1887 г. [81]. Катастрофические сейсмогенные явления стали причиной крупных завалов, образовавших озера Иссык и Большое Алматинское.

Селевая деятельность горных речных бассейнов во многом зависит от гранулометрического и минералогического составов пород четвертичных отложений различного возраста и генезиса. К геолого-генетическим комплексам, принимающим наиболее активное участие в селеформировании, относятся: гляциальные, флювиогляциальные, элювиально-делювиальные, аллювиально-пролювиальные, гравитационные отложения.

К комплексу гляциальных отложений относятся моренные образования. Нижнечетвертичные морены практически не сохранились, поэтому их участие в селевых процессах незначительно. Среднечетвертичные морены сильно эродированы. Они встречаются лишь в среднегорье. В Заилийском Алатау нижняя граница их распространения находится в интервале высот 1600–1800 м. Верхнечетвертичные морены широко распространены, расположены они в среднем на высотах 2600–3000 м. Мощность отложений составляет 100–200 м. Современные (голоценовые) морены распространены на границе нивальной и высокогорной зон в среднем на высотах 3000–3600 м. Как правило, морены в рельефе выражены несколькими уступами, соответствующими положениям фронтальных частей языков ледников в периоды их наступания и отступания [75]. Высота фронтальных уступов составляет 100–150 м. Мощность современных морен изменяется от 30 до 100 м. Гранулометрический состав морен неоднороден. В общей массе преобладают крупнообло-

мочные фракции (25–30 %), наиболее крупные глыбы имеют размер 2–5 м и более. В дресвяно-гравийно-суглинистом заполнителе содержание пылевато-глинистых фракций не превышает 10 % (рис. 48, 49) [13]. Древние и относительно молодые морены в результате переувлажнения, сейсмического воздействия и эрозии могут стать зоной формирования селей. Как правило, это фронтальные части конечных морен. Основной объем селевых выносов – рыхлообломочные породы морен.

Породы комплекса флювиогляциальных отложений представлены валунно-галечниковыми отложениями с песчано-гравийным заполнителем. Породы отличаются рыхлым сложением и относительно слабой устойчивостью на склонах, поэтому при оценке селеопасности того или иного бассейна они рассматриваются как один из потенциально возможных источников пополнения селей твердой составляющей.

Отложения элювиально-делювиального комплекса занимают значительные площади на поверхности водоразделов и горных склонов. Эти отложения характеризуются значительной неоднородностью гранулометрического состава, зависящего в основном от высоты и экспозиции местности. Относительно высокое содержание глинистых фракций в рыхлообломочных породах, приуроченность отложений к крутым склонам часто способствует оползневой деятельности, а низкая плотность рыхлообломочных пород – поверхностному смыву. При выпадении интенсивных и продолжительных жидких осадков этот комплекс становится стартовой зоной селей дождевого генезиса.

На тех участках долин, где морены не сохранились, террасы речных долин, поля и конусы выноса представлены аллювиально-пролювиальными отложениями. Минералогический и гранулометрический составы этих отложений определяются геологическим строением водосборов. Во время прохождения мощных селей аллювиально-пролювиальные отложения принимают участие в формировании селевой массы.

Оловый комплекс представлен преимущественно лессами и лессовидными породами. Эти породы распространены в низкогорной зоне. В условиях современного климата активизация селей в этой зоне происходит в результате антропогенного воздействия. В случае аномального увлажнения лессовые комплексы, особенно при сейсмическом воздействии, могут разжижаться и трансформироваться в грязевые сели.

Гравитационные отложения распространены во всех высотных зонах. Эти отложения, как правило, находятся в состоянии предельного равновесия, поэтому они легко приобретают гравитационную подвижность при переувлажнении или сейсмическом воздействии. В определенных ситуациях гравитационные отложения принимают участие в селевых процессах. Это становится возможным при подрезке селом склонов, представленных рыхлыми образованиями.

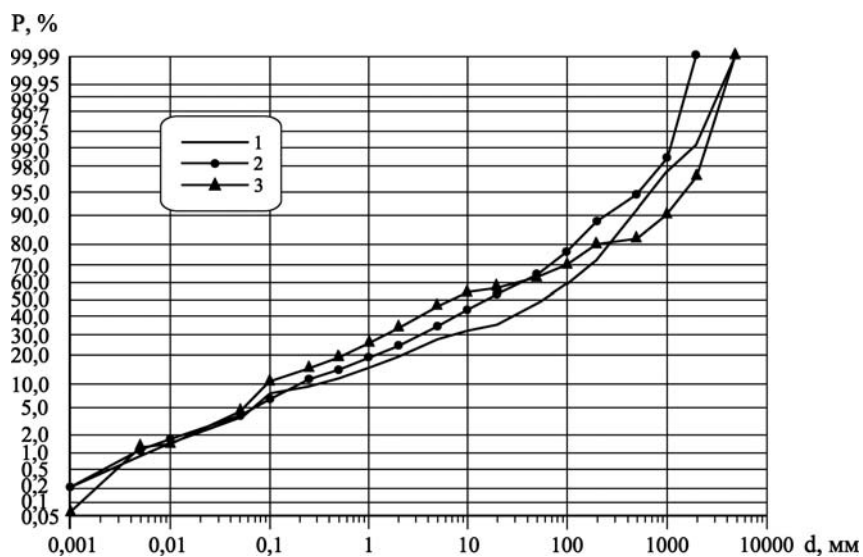


Рис. 48. Полные гранулометрические кривые селеформирующих пород Заилийского Алатау. 1 – Каскелен (древняя морена), 2 – Большая Алматинка (древняя морена), 3 – Кумбель (древняя морена).

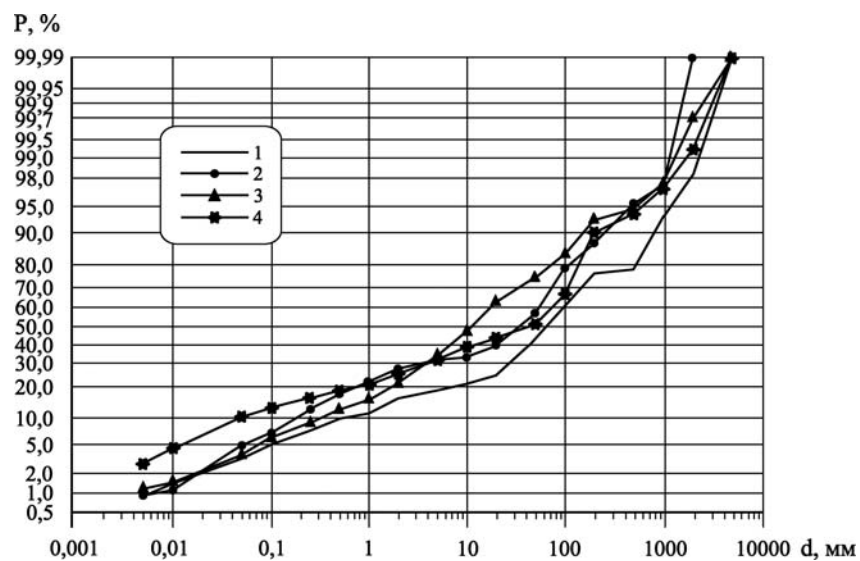


Рис. 49. Полные гранулометрические кривые селеформирующих пород Заилийского Алатау. 1 – Малая Алматинка, 2 – Иссык (селевые отложения), 3 – Тургенъ (древняя морена), 4 – Тургенъ (современная морена).

3.5.1. Состав и свойства пород в селевых бассейнах

Формирование рыхлообломочных пород в бассейнах горных рек происходит в результате эндогенных и экзогенных процессов. Непрерывности процесса формирования таких пород способствует интенсивный снос продуктов выветривания скальных пород в отрицательные формы рельефа под действием сил гравитации. При этом коренные породы подвергаются не только механическому разрушению, но и глубоким химическим изменениям, в результате чего образуются новые минералы преимущественно глинистого состава. Интенсивность процессов физического, химического и биологического выветривания обуславливает образование широкого диапазона крупности обломков – от нескольких метров до долей микрона [11]. Гранулометрический состав рыхлообломочных пород даже в пределах одного селевого бассейна существенно отличается. Например, в высокогорной зоне для грунтов склонов северной экспозиции характерно содержание большого количества крупнообломочных фракций, а для грунтов склонов южной экспозиции – наоборот.

От соотношения фракций гранулометрического состава селеформирующих пород зависят физико-механические свойства селевых смесей (плотность, вязкость и т.д.) [121, 168]. Значительное влияние на физико-механические свойства грунтов и селевых смесей оказывает форма частиц. Форма частиц определяется условиями образования материнской породы, химико-минералогическим составом, характером процессов выветривания, условиями переотложения частиц. Для осыпей, приуроченных к выходу скальных пород на дневную поверхность, характерны угловатые формы. Частицы, образующие морену, имеют степень окатанности значительно выше, чем обломки, образующие осыпь. Алевролиты, мергели, сланцы, слоистые известняки дают щебенку плоской и остроугольной формы.

На рисунках 48, 49 приведены кривые гранулометрического состава селеформирующих пород Заилийского Алатау. Гранулометрический состав заполнителя (до 20 мм) показан на рисунках 50, 51. Из рисунков видно, что породы представлены фракциями от коллоидных до валунно-глыбовых. Содержание крупнообломочных пород, состоящих из обломков крупнее 2 мм, составляет 60–70 %. В большинстве селевых очагов встречаются обломки размером 5–10 м и даже более. Наличие таких обломков придает селевому потоку большую разрушающую силу. Пространство между крупными обломками заполнено мелкоземом. Его количественный и качественный составы определяют реологические свойства селевых смесей. Содержание пылевато-глинистых частиц в гранулометрическом составе селеформирующих пород придает пластические свойства плотной грязекаменной массе, необходимые для поддержания во взвешенном состоянии глыб с размерами до 2–3 м.

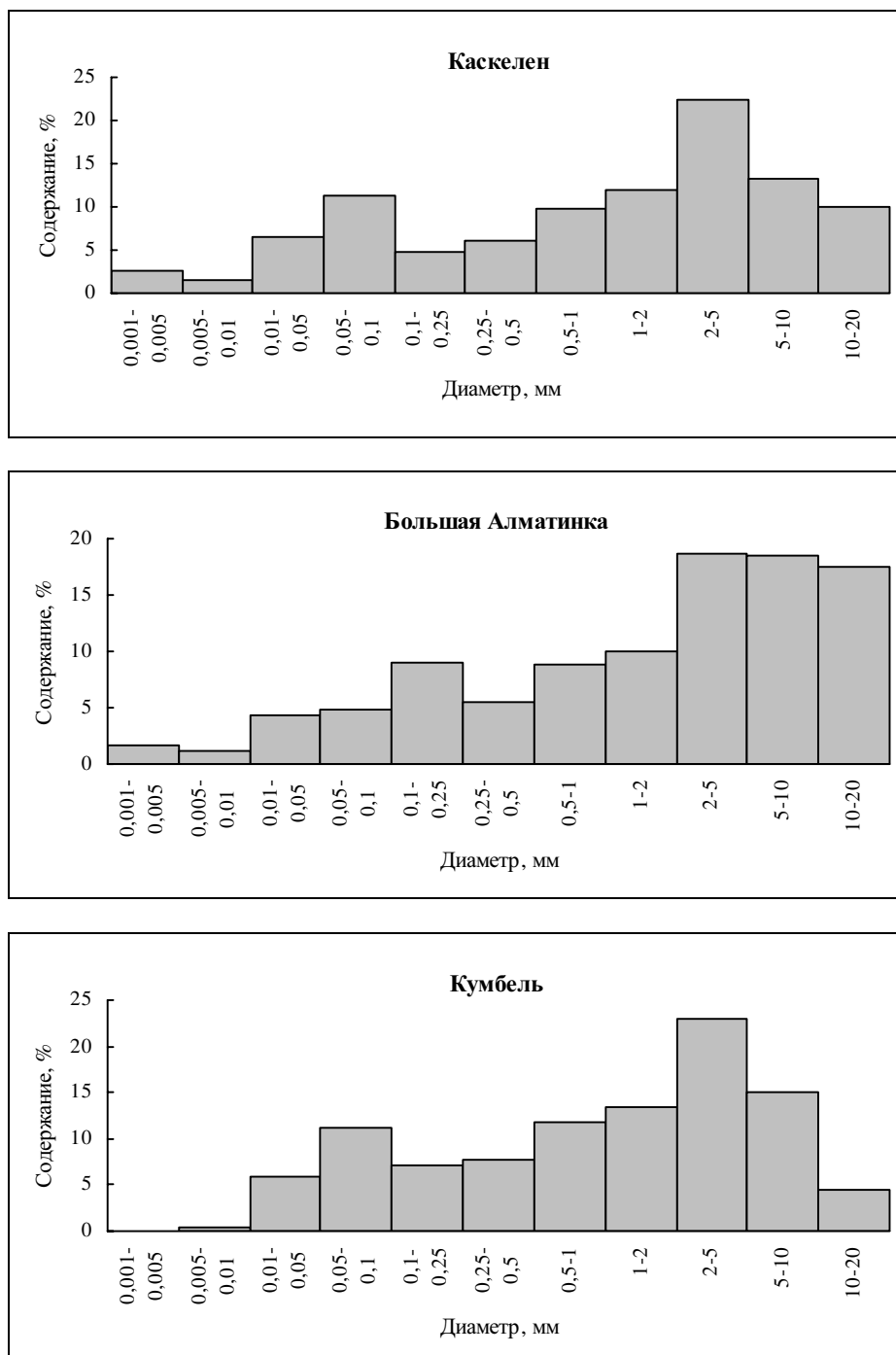


Рис. 50. Гранулометрический состав заполнителя.

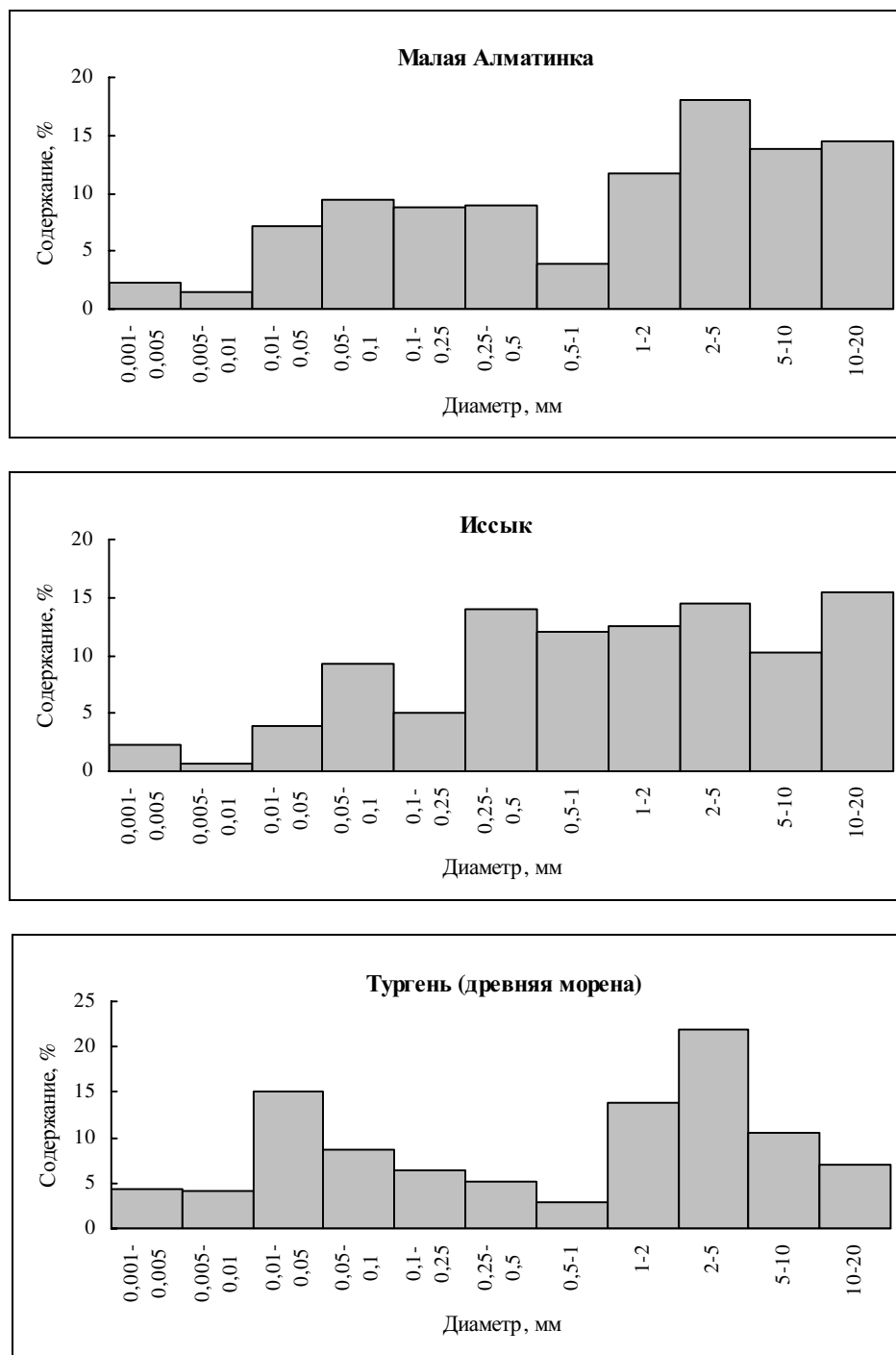


Рис. 51. Гранулометрический состав заполнителя.

В селеформирующих породах большинства селевых бассейнов содержится до 30 % мелкозема (фракции мельче 2 мм, см. рис. 50, 51). Важнейшее значение в составе мелкозема имеют пылевато-глинистые фракции, обладающие большой связностью, липкостью и гидрофильностью. При отсутствии этих частиц в селеформирующей породе вероятность возникновения грязекаменного селя мала. Однако при очень большом содержании этих частиц вероятность возникновения грязекаменного селя также уменьшается, так как порода с большим содержанием пылевато-глинистых фракций будет обладать большой связностью и слабой размываемостью [12]. Содержание пылевато-глинистых фракций в селеформирующих породах колеблется в пределах 0,04–10 %, при этом большую часть составляют пылеватые фракции. Пылевато-глинистые фракции в большинстве селевых очагов представлены гидрослюдами, каолинитом, гидрохлоритами, гидроокислами железа, что и определяет реологические свойства селевых смесей (вязкость и пластичность) [12, 26, 28, 119, 135, 138].

Различные глинистые минералы обладают неодинаковой гидрофильностью. Наибольшей гидрофильностью отличаются минералы группы монтмориллонита, наименьшей – характеризуется каолинит. Гидрослюды занимают промежуточное положение. Свойства селевых смесей находятся в тесной зависимости от количества глинистых частиц, их минерального состава.

Большое значение имеет наличие в горных породах селевых очагов органического вещества. Оно может быть как в виде разложившихся остатков растений, так и совершенно нового образования – гумуса [42]. Гумус обладает высокой гидрофильностью, что придает породе свойство пластичности, увеличивает ее влагоемкость. Незначительное количество гумуса в селевой массе может оказать существенное влияние на ее реологические свойства [151].

3.6. Геоморфологический фактор

Рельеф земной поверхности, история его развития играют важную роль в процессах селеформирования. Изменение рельефа происходит в результате непрерывной борьбы эндогенных и экзогенных процессов. В зависимости от того, какой из этих процессов превалирует в данный отрезок времени, имеет место восходящее или нисходящее развитие рельефа. Увеличение абсолютных и относительных высот, крутизны склонов, усиление денудации характерны для восходящего развития рельефа, обратные явления – нисходящего. Наиболее эффективными эндогенными процессами, способствующими селеобразованию, являются горообразовательные и вулканические. Однако, при определенном сочетании с другими факторами селеобразования, даже эпейрогенические движения земной коры могут приводить к рельефообразованию, благоприятствующему формированию селей.

В селеобразовании роль абсолютной потенциальной энергии, которой обладают твердая и жидкая компоненты селевой массы, ничтожно мала: селей не бывает на высокогорных плато, но они образуются на склонах океанических впадин. Достаточные величины уклона и длины русла, т.е. величины, характеризующие относительную потенциальную энергию селевой массы, а также градиент этой энергии, являются необходимым условием формирования селевого потока в результате взаимодействия водного потока с рыхлообломочными породами. Если селевой поток образуется при разжижении увлажненных рыхлообломочных пород в результате потери ими устойчивости, то необходимым условием его движения является достаточная величина уклона. Минимальное необходимое значение потенциальной энергии и ее градиента для образования селевой массы с заданными характеристиками в значительной степени определяются гранулометрическим и минералогическим составами рыхлообломочных пород, которые в свою очередь определяются геологическим, климатическим, геоморфологическим и другими факторами.

Местом зарождения и развития селей являются отрицательные формы рельефа: рытвины и врезы, образованные в моренах и склоновых отложениях в ходе эрозионных процессов (главная роль в которых принадлежит водной эрозии или собственно селевым процессам). Зарождение селей возможно даже в пределах положительных форм рельефа, например, при сдвиге аномально увлажненных рыхлообломочных масс.

Рельеф Заилийского Алатау имеет ряд зональных особенностей, позволяющих разбить его по вертикали на отдельные пояса. Скально-ледниковое высокогорье (выше 3500 м) отличается сильной расчлененностью. Амплитуда относительных высот достигает 1000 м и более. Гребни хребтов острые, зубчатые. Склоны крутые, часто обрывистые с широким развитием каров и кулуаров. Часть территории занята оледенением, другая – сравнительно недавно освободилась от ледников. Современное оледенение Заилийского Алатау состоит из 460 ледников общей площадью 262 км² [114]. В этом поясе развиты процессы физического выветривания и массового движения обломочного материала. Ледники, являющиеся основным агентом денудации, выносят большие объемы твердого материала в высокогорный пояс, где формируются конечные морены.

Высокогорье (2700–3500 м) характеризуется сочетанием крутых склонов и широких троговых долин. Наряду с многочисленными эрозионными врезами и рытвинами широко распространены слаборасчлененные участки значительной протяженности. Около 50 % площади высокогорья приходится на склоны круче 20°. Глубина вертикального расчленения почти на всей территории превышает 500 м, около 20 % поверхности характеризуется относительным превышением более 1000 м. Вместе с тем, высокогорье отличается сравнительно небольшой

дробностью расчленения: почти на 65 % поверхности горизонтальное расчленение не превышает $0,25 \text{ км/км}^2$ [109]. На высотах 3300–3500 м находится основная масса моренных озер [98], обрамленных моренными валами. Это – зона первичного вовлечения твердого материала прорывными паводками, возникающими при опорожнении озер.

Среднегорье (1600–2700 м) характеризуется господством крутосклонного глубокорасчлененного рельефа. В этом поясе процессы экзогенного рельефообразования менее выражены по сравнению с высокогорьем. Выше 2000–2200 м преобладают площади с глубиной расчленения 700–800 м. Долины узкие, V-образные. Преобладают крутые склоны, расчлененные логами и руслами боковых притоков [109]. Крутые склоны покрыты лесом (за исключением склонов южной экспозиции), что замедляет развитие эрозионных процессов. Поверхности, где горизонтальное расчленение превышает $0,50 \text{ км/км}^2$, составляют около 45 % суммарной площади [109]. Известно, что интенсивность эрозии определяется характером расчлененности рельефа. Наиболее активна она на грядово-грядистом и грядовом рельефе. Об этом свидетельствуют многочисленные линейные очаги селеформирования, представленные эрозионными рытвинами. Ниже отметок 2000–2200 м относительные превышения постепенно уменьшаются до 200–300 м. Рельеф приобретает все более плавные очертания, однако крутые (более $20\text{--}25^\circ$) склоны преобладают [109]. Здесь эрозия менее активно развита.

Низкогорье (800–1600 м) представлено относительно невысокими грядами (прилавками). Поверхность их двухступенчатая. Морфологически данный тип рельефа представлен невысокими гребнями и мягкими формами водоразделов, отходящими от основного массива хребта на север. На границе прилавков и среднегорья в западной части хребта находится полоса очагов рассредоточенного селеобразования. Формирование их связано с новейшими сейсмическими движениями, происходящими по тектоническим разломам [148]. Прилавки представляют собой сглаженные грядовые, грядово-увалистые формы. Глубина эрозионного расчленения прилавков 100–200 м. Здесь значительную опасность, с точки зрения селеобразования, представляют оползневые процессы. Оползни формируются на крутых склонах речных долин, где оползневые массы нередко трансформируются в грязевые потоки. Оползневой генезис зарождения селей характерен для долин рек Турген, Талгар, Малая и Большая Алматинки и др. [75]. Как правило, врезанные в прилавки русла рек являются зоной транзита и частичной аккумуляции селевых потоков, лишь катастрофические сели выходят за ее пределы.

При выходе основных рек на предгорную равнину происходит аккумуляция селевой массы и окончательное гашение селевого процесса. Здесь находятся конусы выноса крупных рек. Конусы выноса веерообразно расширяются, нередко сливаются и образуют огромный шлейф у подножия гор. Абсолютная вы-

сота зоны конусов выноса – от 800 до 1000 м, уклон – в среднем 2° . Конусы выноса сложены в вершинах грубообломочным песчано-галечно-валунным материалом, а ближе к основанию – супесями и суглинками и плохо сортированным щебнисто-галечным материалом. Все эти отложения являются продуктами разрушения гор, вынесенные водными и селевыми потоками.

Таким образом, описанные пояса различаются не только по характеру рельефа, но и по особенностям проявления всего комплекса экзогенных процессов, включая и селевые. В скально-ледниковом высокогорье формирование селей в основном связано с деградацией оледенения. В высокогорье – сильной расчлененностью, большими уклонами поверхностей, способствующих массовым гравитационным перемещениям пород на склонах. В среднегорье и низкогорье селевая деятельность в основном определяется эрозионными процессами. Наряду с этим, в низкогорном поясе значительную опасность, в качестве начальной фазы селеобразования, представляют оползни.

3.7. Почвенно-растительный фактор

Известно, что процесс селеобразования в значительной степени зависит от инфильтрационных и фильтрационных характеристик почвогрунтов. Основными факторами, предопределяющими потери талых и дождевых вод на водосборах на инфильтрацию и фильтрацию, являются механический состав почвогрунтов, степень их увлажненности, наличие трещин и т.д.

Результаты исследований водопропускной способности почвогрунтов северного склона Заилийского Алатау показывают, что коэффициент фильтрации, в зависимости от характера почвогрунтов, изменяется от 0,2 до 12 мм/мин. В высокогорной и низкогорной зонах коэффициент фильтрации несколько меньше, чем в среднегорной зоне. Наибольшей водопропускной способностью обладают почвогрунты среднегорной зоны. Коэффициент фильтрации здесь достигает 8–12 мм/мин. На лугах среднегорной зоны коэффициент фильтрации находится в пределах 1,5–7 мм/мин, а непосредственно под кронами деревьев – 5–6 мм/мин. Фильтрационная способность почвогрунтов на склонах северной экспозиции несколько больше, чем на склонах южной экспозиции. Повышенной фильтрацией во всех высотных зонах обладают осыпи, пониженной – древние морены с мало-мощным, но уплотненным почвенным покровом и участки выпаса скота. Резко уменьшается коэффициент фильтрации на глинистых горизонтах лессовидных суглинков, распространенных в низкогорной и среднегорной зонах [71, 103, 107].

Инфильтрационные и фильтрационные характеристики почвогрунтов, наряду с ходом выпадения осадков, в значительной степени определяют характер стока. При низкой инфильтрации в почвогрунтах и большой интенсивности вы-

падающего дождя образуется поверхностный сток, концентрация которого может привести к превышению критического значения расхода и развитию эрозионно-сдвигового селевого процесса. Высокие инфильтрационные характеристики и продолжительные осадки способствуют увлажнению мощных толщ почвогрунтов и созданию предпосылок для сдвигового селевого процесса.

Противоэрозионное значение растительного покрова заключается, прежде всего, в образовании плотной дернины, предохраняющей горные склоны от эрозии. Дернина и корни деревьев, препятствуя эродирующему действию поверхностного склонового стока, хорошо закрепляют делювиальные и коллювиальные отложения. Почвенно-растительный покров – один из элементов высотных ландшафтных поясов Заилийского Алатау, которые в общих чертах совпадают с ярусами рельефа и климатическими поясами [49].

Нивальная зона – пояс скал, снегов и ледников расположен выше 3500 м. Почвы и растительность здесь не развиваются.

Высокогорная лугостепная зона объединяет два вертикальных пояса – альпийский и субальпийский. Альпийский пояс располагается в диапазоне высот 3000–3500 м, примыкая непосредственно к вечным снегам и ледникам. Почвенный и растительный покров развит фрагментарно на относительно выровненных участках. Мощность почв здесь невелика и редко достигает 40 см. Почвы малогумусные. Растительный покров представлен низким травостоем высотой 25–30 см. В верхней части пояса произрастают мхи и лишайники. Субальпийский пояс расположен между альпийскими лугами и лесной зоной в диапазоне высот 2700–3000 м. Почвенный и растительный покровы здесь занимают значительные площади. Склоны большей частью покрыты густым травостоем и арчевником, поэтому процессы эрозии протекают слабо. Однако при нарушении сплошности покрова довольно быстро возникают эрозионные рытвины и врезы. В комплексе защитных противоселевых мероприятий вопросы охраны почв и растительности в субальпийском поясе должны занимать одно из важных мест.

Лесолуговая горная зона располагается в диапазоне высот 1600–2700 м. Растительный покров этого пояса представлен сочетанием лесов и разнотравно-злаковых лугов. Лес расположен отдельными разобщенными массивами, занимая обычно северные склоны. Южные и юго-западные склоны, как правило, покрыты разреженной степной растительностью с зарослями кустарников или они остаются обнаженными, интенсивно подвергаясь денудационным процессам. Горный лес имеет большое противоэрозионное значение. Моховый и мертвый покров (лесная подстилка) обладают высокой влагоемкостью и способствуют снижению поверхностного стока. Сомкнутые кроны деревьев задерживают большую часть выпадающих осадков, ослабляют сток и рассредоточивают его во времени. Кроме

того, некоторые древесные породы хорошо закрепляются на осыпях, способствуя их стабилизации. Мощность почв здесь достигает 50–60 см.

Лесостепная горная зона располагается в диапазоне высот 1000–1600 м. Относительно плоские водораздельные участки покрыты разнотравьем, на долю которых приходится до 40 % площади. Основными почвообразующими породами являются суглинки, которые имеют низкий показатель противозерозионной стойкости. При достаточно развитом растительном покрове на относительно пологих участках следов активной эрозионной деятельности не наблюдается. Однако при нарушении сплошности покрова эрозионные процессы активизируются. Следовательно, почвенно-растительный фактор в значительной степени определяет возможность возникновения селеопасного стока.

Прогнозируемое глобальное потепление климата может привести к существенной трансформации ландшафтов гор. В связи с этим, важную роль в уменьшении селевой активности может сыграть фитомелиорация в низкогорной и высокогорной зонах.

3.8. Антропогенный фактор

Хозяйственная деятельность человека может не только влиять на селеформирующие факторы, но и создавать их там, где в природных условиях они отсутствуют. Схема, показывающая связь вида деятельности человека с возможностью возникновения селей, приведена в [134]. На рисунке 52 эта схема претерпела некоторые изменения.

Впервые с проблемой активизации селей, обусловленных хозяйственной деятельностью, человечество столкнулось при освоении горных территорий. Вырубка леса, лесные пожары, уничтожение растительности на горных пастбищах при чрезмерном выпасе скота влекут за собой развитие селевых явлений. Растительность обладает водорегулирующей способностью. Разрушение растительного покрова приводит к уменьшению перехвата осадков растительностью, изменению структуры почв, вследствие чего активизируются эрозионные процессы. В зонах многолетней мерзлоты, повышенного увлажнения и т.д. уничтожение растительности может приводить к активизации оползней. В 19 веке в результате беспорядочной вырубки лесов на горных склонах Альп активизировались селевые явления во многих приальпийских странах. Правительства этих стран были вынуждены принять законы о сохранении лесов [143]. Лесные пожары в Забайкалье и на Дальнем Востоке уничтожили значительные площади лесов. В результате на горных оголенных склонах селевые явления активизировались.

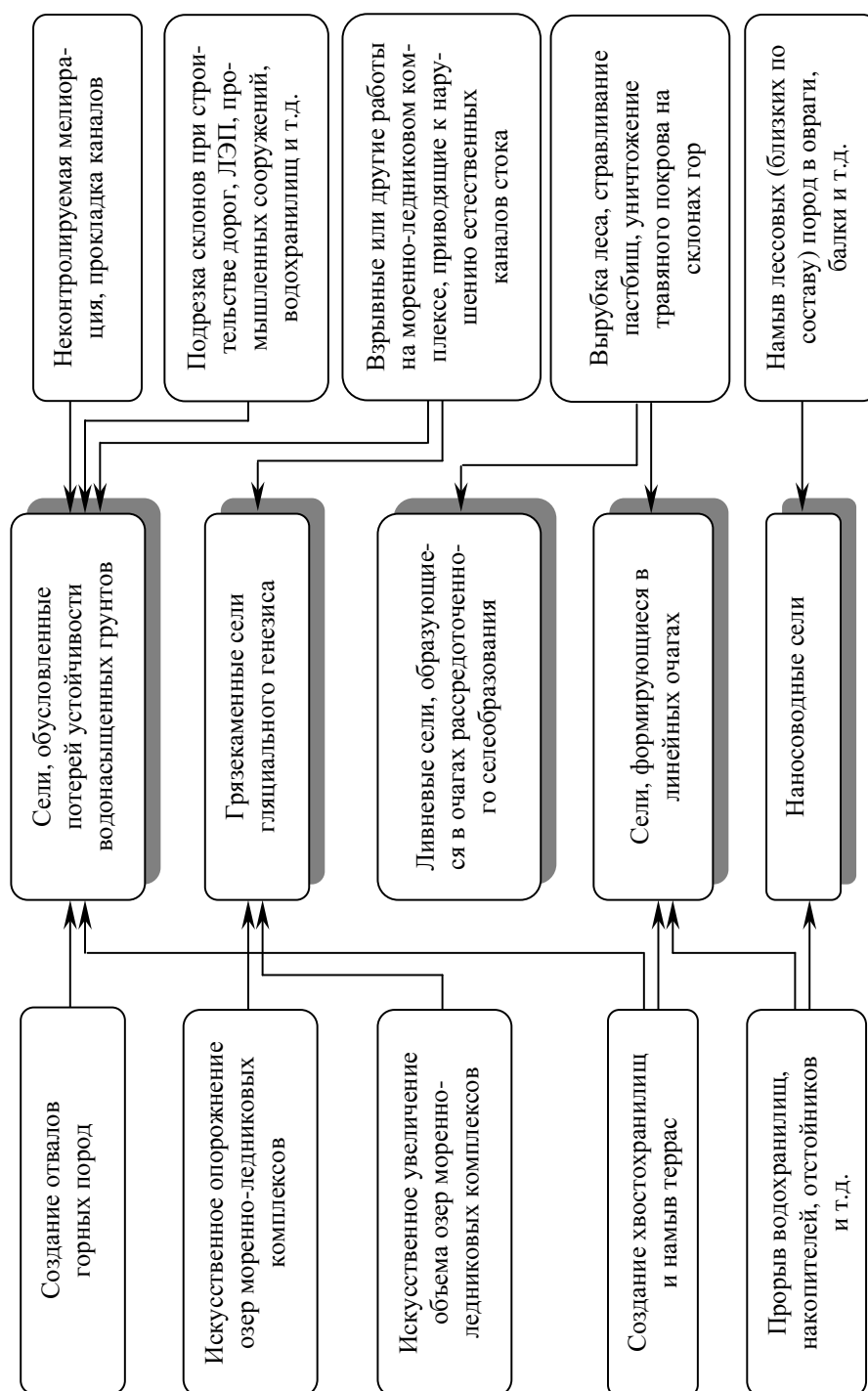


Рис. 52. Виды деятельности человека, приводящие к возникновению селей.

Неконтролируемая мелиорация, неправильное проектирование и эксплуатация оросительных систем становятся причиной водонасыщения больших массивов грунтов. Это создает условия, благоприятствующие образованию оползней, трансформирующихся в селевые потоки. Учащающиеся с каждым годом случаи оползания дачных участков в результате неконтролируемого орошения приводят не только к разрушению жилых построек и гибели насаждений, но и человеческим жертвам. При малых углах залегания водонасыщенных грунтов, когда сила тяжести не способна привести их к сдвигу, причиной формирования оползней могут стать относительно небольшие землетрясения, способные привести к разжижению переувлажненных грунтов.

Особую опасность представляют водонасыщенные грунты, использующиеся для заполнения оврагов, создания (путем намыва) плотин, террас и дамб. В равной мере это относится и к хвостохранилищам (рис. 53).



Рис. 53. Хвостохранилище Тырныаузского горнообогатительного комбината (Северный Кавказ) (фото М.Д. Докукина).

Огромные масштабы вскрышных работ, предшествующих добыче полезных ископаемых, привели к тому, что отвалы горных пород становятся соизмеримыми с природными очагами селеформирования (рис. 54). Выпадение ливневых дождей на описываемые массивы рыхлообломочных пород может приводить к селеформированиям, имеющим различные механизмы. Наиболее распространенным, но, как правило, не имеющим катастрофических последствий, является процесс селеформирования, обусловленный эрозионным воздействием

воды в ручейковой сети на поверхности отвалов. Более опасная ситуация возникает, когда создаются условия для концентрации стока во внутренних каналах отвалов. При определенных условиях происходит обводнение больших объемов рыхлообломочных пород, их сдвиг и трансформация в селевой поток. Создание отвалов пустой горной породы в долинах горных рек может приводить к формированию селевых потоков во время паводков.



Рис. 54. Отвал горной породы в Большой Мукуланской балке (Северный Кавказ) (фото М.Д. Докукина).

Искусственное опорожнение озер моренно-ледниковых комплексов, осуществляемое для предотвращения их неконтролируемого катастрофического опорожнения в ходе природных процессов, представляет большую опасность. Работы по искусственному опорожнению озер проводятся, как правило, без использования средств механизации из-за сложности их доставки. При прокладке водоотводного канала применяется ручной труд, взрывные работы, используется энергия воды, накопившейся в озере. Водные попуски осуществляются с целью срыва

отмостки в сооружаемом канале, а также размыва и транспортировки относительно мелких фракций грунта озерной перемычки. Наибольшую сложность при проведении описываемых работ представляет определение оптимальных значений расхода и объема попусков воды из озера. При их заниженных значениях велика вероятность формирования отмостки, разрушить которую в дальнейшем невозможно без привлечения взрывных работ. При их завышенных значениях велика вероятность неконтролируемого разрушения озерной перемычки и формирования прорывного паводка, трансформирующегося в селевой поток.

Неправильное проектирование, строительство и эксплуатация селезащитных сооружений чревато катастрофическими последствиями. Занижение расчетных значений емкостей селехранилищ неизбежно приведет к их переполнению и аварийной ситуации (при отсутствии селесбросов через гребень плотины). Использование некондиционных грунтов при отсыпке плотин и некачественная гидроизоляция плотины со стороны верхнего бьефа создают предпосылки для их разрушения при заполнении селехранилищ и формирования вторичных селей. Изменение конструкции водосбросных сооружений в ходе эксплуатации, открытые технологические люки селезадерживающих плотин и т.д. могут привести к закупорке водоотводных тоннелей и, как следствие, переполнению селехранилищ в результате накопления воды.

При неправильном проектировании, строительстве и эксплуатации накопителей сточных вод, отстойников и т.д. создается наибольшая селевая угроза. Такие объекты, возводимые в пустыне, становятся фактором селеформирования. Отсутствие крупных фракций в составе песка пустынь благоприятствует формированию селевых масс с плотностью 1950–2000 кг/м³ даже в ситуациях, когда перепад высот рельефа местности находится в пределах 50–70 м. На уклонах менее одного градуса при глубине потока 2–3 м такая селевая масса способна перемещаться на несколько километров. Этот вид антропогенных селей отличается, помимо всего, возможностью загрязнения природной среды.

3.9. Взаимодействие факторов селеформирования

Влияние любого фактора селеформирования на образование селя не является абсолютным. Его действие является относительным 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 [63]. Глобальный климат – ансамбль состояний (или режима) метеорологической составляющей системы атмосфера-океан-суша-криосфера, который она прохо-

дит 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 в пределах от $-9,1$ до $2,7$ °C [166].

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 $7,2$ °C и т.д. Вариации этих показателей объясняются общими закономерностями изменений циркуляционных и радиационных процессов в связи с поднятием местности.

Мезоклиматы – климатические единицы, из которых складывается 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, например, годовая норма осадков на северном склоне Заилийского Алатау, по показаниям суммарных осадкомеров на леднике, достигает 1300 мм [115]. С уменьшением абсолютных высот количество осадков уменьшается: метеорологическая станция Алматы – 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 Заилийского 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 Заилийского Алатау и прилегающих к нему гор. Располагаясь на пути движения влагонесущих воздушных масс, северные склоны Заилийского 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 Заилийского Алатау и окруженных почти со всех сторон высокими горными хребтами. На рисунке 55 представлены данные об изменении слоя годовых сумм осадков в зависимости от высоты местности на северном склоне Заилийского 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 56 [140].

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 оказывает влияние экспозиция форм 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 щебнисто-глыбовые и глыбовые фракции.

Формы рельефа, их экспозиция, затененность отдельных участков рельефа оказывают большое влияние на размеры оледенения. Сами же формы рельефа в значительной мере являются результатом деятельности ледников [108]. Большая часть долин Заилийского Алатау представляет собой трогги, 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 Заилийского Алатау конечные морены рисского оледенения расположены на высоте 1600–1800 м, вюрмского – на высоте 2400–2600 м. В Заилийском Алатау моренные отложения являются главным источником твердой составляющей селей.

Геологический и геоморфологический факторы, например, состав и свойства коренных пород, тип рельефа, глубина и густота расчленения, величина наклона 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 выше характеристики селей оказывает климат.

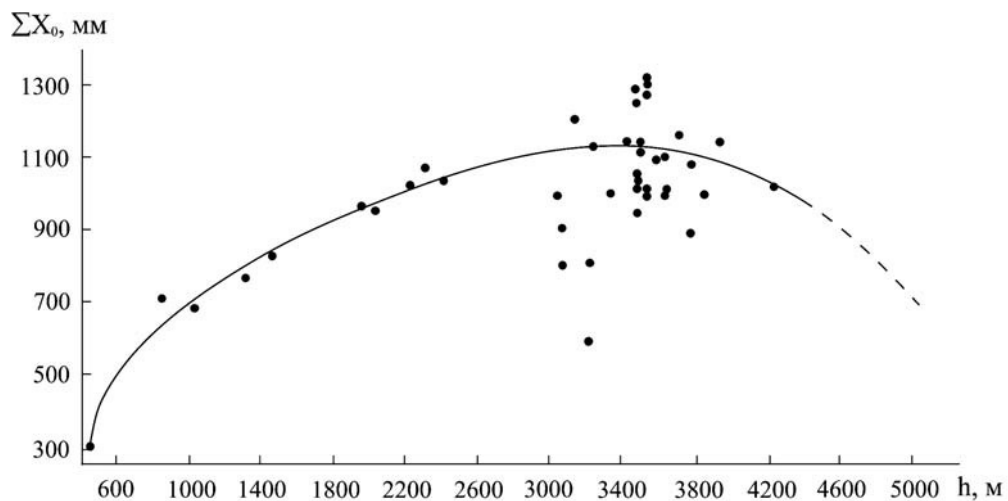


Рис. 55. Распределение атмосферных осадков с высотой на северном склоне Заилийского Алатау (1957–1974 гг.).

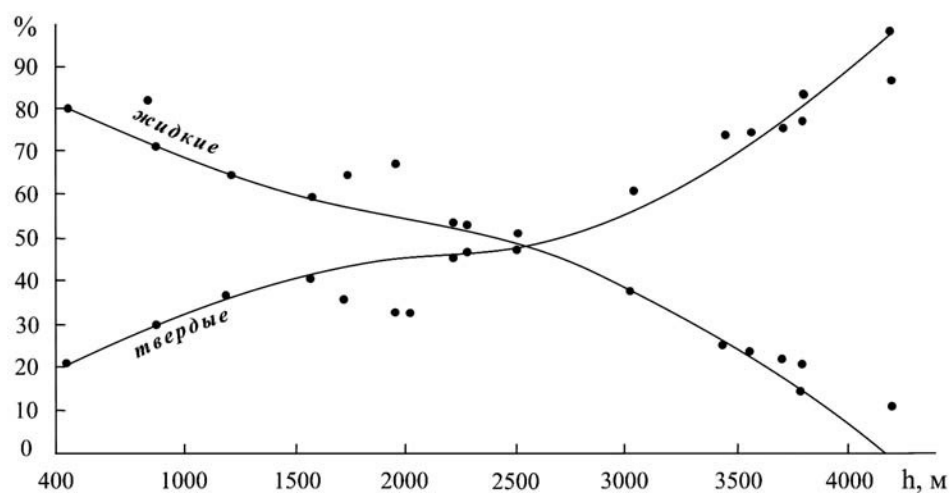


Рис. 56. Изменение твердых и жидких осадков в зависимости от высоты (северный склон Заилийского Алатау).

Селевые потоки являются одним из ландшафтообразующих факторов. В свою очередь ландшафты в значительной мере определяют условия образования

селей. В пределах ландшафтных зон действие селеформирующих факторов может быть как однонаправленным, так и разнонаправленным. Так, 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 способствует 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 [142].

Увлажнение грунтов сглаживает гидрограф паводков, но приводит к аккумуляции воды в грунтах, что может способствовать лавинообразному нарастанию расхода и объема селей [136]. Увлажнение грунтов приводит 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 Заилийского Алатау и их обращенность к влагонесущим воздушным массам благоприятствуют селеформированию. Однако высокая влажность и относительно небольшая солнечная радиация благоприятствуют произрастанию лесолуговой растительности, уменьшающей селевую опасность.

Разнопланово может проявляться и тектонический фактор. Так, anomalно высокая тектоническая активность в бассейне р. Иссык настолько уменьшила прочность горных пород, что скорость денудации в этом бассейне увеличилась почти вдвое по сравнению с другими бассейнами северного склона Заилийского Алатау. В результате объем конуса выноса р. Иссык имеет вдвое больший объем, чем он имел бы в условиях ординарной тектонической активности [130]. Однако мощное землетрясение, произошедшее, скорее всего, 15–20 тыс. лет назад, явилось причиной обвала, перегородившего долину р. Иссык в среднегорной зоне. Образовавшееся естественное селехранилище препятствовало выносу наносов на конус выноса р. Иссык [127].

Число примеров взаимного влияния селеформирующих факторов можно было бы значительно увеличить. Однако, слегка перефразируя М.В. Тронова [142], можно утверждать, что в комплексе взаимодействующих факторов селеформирования влияние каждого из них, каким бы он не казался определяющим, может очень сильно изменяться.

Глава 4

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ СЕЛИ СЕВЕРНОГО СКЛОНА ЗАИЛИЙСКОГО АЛАТАУ

На северном склоне Заилийского Алатау сели – распространенное природное явление. Незначительные по мощности сели имеют место практически ежегодно. «... По далеко не полным данным ...» [75], за период с 1841 по 1990 гг. в горах Заилийского Алатау было зарегистрировано 450 случаев селепроявлений. Только в бассейне р. Малая Алматинка за последние 300 лет обнаружены следы более 20 селей [39], в бассейне р. Чемолган – 14 случаев прохождения селей [5]. Сведения о большинстве из них получены дендрохронологическим и лихенометрическим методами. Поскольку большинство селей останавливалось в горной местности и они не были связаны с гибелью людей, а также большим материальным ущербом, эти сели не приобрели широкой известности.

В главе 1 приведено краткое описание некоторых катастрофических селей, а также сведения об их генезисе, характеристиках и ущербе, нанесенном ими. В данной главе основное внимание уделено механизмам зарождения и трансформации характеристик селей вплоть до их остановки.

Наиболее крупные сели в Заилийском Алатау были вызваны мощными землетрясениями, которые вошли в каталог сейсмических катастроф Земли, или их последствиями.

4.1. Катастрофический сель конца плейстоцена в бассейне р. Большая Алматинка

Наиболее катастрофическим селом Заилийского Алатау, следы которого сохранились и через десятки тысяч лет, является сель, образовавшийся в результате прорыва Праозера, предшествовавшего Большому Алматинскому озеру. Завал, который привел к образованию Праозера, произошел в результате землетрясения, имевшего место 15–20 тыс. лет назад. Объем завала оценен в 200–300 млн. м³. Вода, накопившаяся за завалом, перегородившим долину

р. Озерная, образовала Праозеро [127]. В результате прорыва Праозера, объем которого составлял 100–150 млн. м³, из тела завала было вынесено 100–150 млн. м³ рыхлообломочных пород. Вынос 200–300 млн. м³ водокаменной массы привел к существенному изменению строения конусов выноса рек Большая и Малая Алматинки. Отложения селей рисс-вюрмского межледниковья на площади несколько десятков квадратных километров (на глубину более 3 м) были замещены отложениями наносоводного потока, сформировавшегося в конечной фазе образования прорана в теле завала. Максимальный расход наносоводного потока мог достигать десятков тысяч кубометров в секунду.

4.2. Сель 1841 года

Сель 1841 г. впервые описан Э.М. Женжуристом со слов лесничего Н.Е. Ковшарова и др. «Размер несчастья был настолько велик, что живущих в местности, которую теперь занимает Алма-Ата, калмыков осталось в живых после катастрофы не более 10 %. Эти счастливые были так напуганы происшедшим несчастьем, что положительно все, оставив Алма-Атинскую долину, ушли из насиженных мест вверх по Илийской долине в пределы Китая. Вместо ушедших пришли в долину и поселились в ней другие калмыки, а затем в 1854 г. и русские». Однако достоверность этого события вызвала сомнение у Е. Дуйсенова. «... Дело в том, что ни в каком источнике до Э.М. Женжуриста (1923) нигде не упоминается катастрофа 1841 г. Эти места через 10–50 лет после указанной даты посещались такими известными и наблюдательными исследователями, как П.П. Семенов-Тяньшанский (1846), Н. Северцев (1867), М. Венюков (1861), Ч. Валиханов (1904) и И.В. Мушкетов (1890), которые интересовались природой края. И.В. Мушкетов специально занимался изучением «оплывин» (селевых потоков), образованных при землетрясениях. Трудно поверить, чтобы все они прошли мимо такого крупного и серьезного факта, тем более, что они имели тесный контакт с местными жителями» [44].

В.Д. Городецкий, также интересовавшийся этим вопросом, пришел к выводу, что «ни в памяти русского населения, ни казахского не сохранилось воспоминание о подобных катастрофах в прошлое время» [41].

Принимая во внимание вышесказанное, Е. Дуйсенов приходит к выводу, что «факт о событиях в 1841 г. не имеет серьезного обоснования» [44]. В месте с тем результаты исследований последних лет свидетельствуют о том, что в бассейнах рек Малая Алматинка и Аксай обнаружены следы прохождения селей 1841 г. Так, в устье р. Сарысай, на правом берегу р. Малая Алматинка, сохранились селевые валы из крупных валунов. Их возраст, определенный дендрохронологическим способом, свидетельствует, что это отложения селя 1841 г. [39].

4.3. Сели (оползни-потоки) 8 июня (28 мая) 1887 года

Областью распространения крупных обвалов и оползней 1887 г., некоторые из которых трансформировались в селевые потоки, были средне- и низкогорная зоны. Там сосредоточены многометровые толщи лесса, обводнение которых происходит как за счет атмосферных осадков, так и подземных вод при их выклинивании на поверхность. Описание событий, вызванных землетрясением 1887 г. (магнитуда – 7,3; интенсивность землетрясения в эпицентре – 9–10 баллов [84]), приведено в [81]. Наиболее крупные обвалы (Акжар и Кокчека) произошли в бассейнах рек Аксай и Большая Алматинка. Общий объем обвальных масс составил около 50 млн. м³ [81].

Результаты исследований последствий катастрофических землетрясений в Заилийском Алатау: Верненского (1887 г.), Чиликского (1889 г.), Кеминского (1910 г.), выполненных под руководством И.В. Мушкетова и К.И. Богдановича, свидетельствуют о том, что наибольшую опасность для этого района представляли оползни, формировавшиеся в результате разжижения лесса верхней предгорной ступени.

В 1887 г. крупные и практически непрерывные разрушения на северном склоне Заилийского Алатау находились между долинами рек Котур-булак и Аксай включительно. Разрушения были представлены трещинами, оползнями, обвалами и поверхностными сдвигами как в коренных, так и в рыхлых породах. Общий объем разрушений составлял около 440 млн. м³.

Наибольшие размеры имели оползни в долине Прямая Щель. «... Длина главной оплывины от соединения восточной и западной ветвей до нижнего ее конца около 7000 м, ширина ее различна – от 100 до 500 м, а толщина – от 30 до 60 м ...». Общий объем сдвинутых пород составил 126 млн. м³ [81].

Особый интерес представляет оползень, сформировавшийся в долине р. Проходная. «... Поражает своею величиною громадная оплывина, тоже с валунами, вышедшая из левого притока Урта-сай (Проходная) ... Из этого ущелья с необыкновенною быстротою изверглась громадная оплывина ... Оплывина эта, даже в конце, т.е. в долине р. Большая Алматинка, имеет до 60 м толщины; она совершенно завалила ущелье на всю ширину до 300 м и по длине версты на 3 ... Даже в августе она еще была непроходима вследствие больших неровностей и громадных трещин ... в ее состав входили ... громадные валуны гранита ... Масса ее не менее 54 млн. м³» [81].

И.В. Мушкетов не приводит описания условий формирования этого оползня. Однако велика вероятность, что оползень образовался в результате разжижения морены, сохранившейся в нижней части долины р. Проходная после окончания рисского оледенения.

В пользу этой гипотезы свидетельствуют:

- отсутствие условий для формирования селя (оползня) с таким гигантским объемом в интервале высот 1700–2500 м;
- отсутствие следов движения такого селя (оползня) выше санатория Алма-Арасан;
- наличие хорошо сохранившихся заплечиков рисской морены в нижней части долины р. Проходная;
- в состав оплывины «... входили громадные валуны гранита»;
- близкие значения объема «оплывины» и гипотетической морены;
- наличие выхода подземных вод в районе санатория Алма-Арасан, в том числе и в прирусловой зоне р. Проходная (русло реки на этом участке выполнено в коренных породах), которыми и могла обводняться морена;
- относительно малый уклон долины – 3–5°;
- оползневая масса обладала ярко выраженным свойством пластичности;
- моренные отложения находились в зоне высокого сейсмического воздействия: на северо-северо-западе, в 2–3 км от места формирования оползня, сейсмические напряжения привели к разрушению «гранитной горы» с образованием большого обвала (24 млн. м³) [81].

Оползни 1887 г. не вышли на территорию г. Алматы из-за низкой степени увлажнения лессовых пород, разжижение которых, в результате сейсмического воздействия, и привело к формированию большинства оползней и потоков. В значительной мере этому способствовало отсутствие в долинах, где образовались мощные оползни, крупных водотоков. Малая скорость движения оползней и потоков помогла избежать больших жертв и материальных потерь.

Иная ситуация сложилась в бассейне р. Аксай. Разжижение оползневых и обвальных масс водами реки привело к образованию селей, которые вышли за пределы конуса выноса. «... только в ночь с 28 на 29 мая Аксай прорвал запрудившие его плотины и вынес с громадною быстротою массу скопившейся воды вместе с грязью, которая образовала своего рода оплывину, очень жидкую и прошедшую даже до Ташкентской почтовой дороги, т.е. верст 15 вне гор, где, разлившись на широкой площади, заполнила все канавы, лога до 1 м глубиною, снесла мосты и вообще испортила дорогу на протяжении 8 верст настолько, что сообщение между Верным и Каскеленом прекратилось» [81].

4.4. Сель 8 июля 1921 года

По достоверным данным сель 8 июля 1921 г. нанес наибольший ущерб г. Верный. Сель сформировался в результате выпадения интенсивного дождя в высо-

когорной и среднегорной зонах северного склона Заилийского Алатау. Интенсивные осадки выпали на всей территории хребта. Однако максимальные значения интенсивности и слоя имели место в бассейне р. Малая Алматинка, а именно в бассейнах ее притоков: Сарысай и Чимбулак. А.Ф. Вержбицкий и В.В. Епанечников, обследовавшие долину р. Малая Алматинка через несколько дней после катастрофы, отметили, что следы значительных паводков имеются в руслах рек Казачка (Бедельбай) и Горельник, несколько «повышенный» паводок прошел по р. Кимасар. В долинах рек Батарейка и Саркрама следы паводка не обнаружены. Это указывает на то, что ливневые осадки 8–9 июля 1921 г. выпадали крайне неравномерно [19, 46].

По словам А.Ф. Вержбицкого [19], бассейн р. Чимбулак явился основным источником селя 1921 г. Очагами зарождения селя были рытвины, расположенные на юго-западном склоне г. Чимбулак (3440 м) и два селевых вреза (рис. 57). Селевые потоки, зародившиеся в рытвинах, сливались во врезе Левый Чимбулак и продолжали развиваться, сливаясь с селом, сформировавшимся во врезе Правый Чимбулак, на высоте около 2450 м. Дальнейшее развитие селевого процесса происходило во врезе, правым бортом которого является склон, представленный коренными породами, а левый – моренными отложениями. В результате эрозионного углубления врезов произошли мощные оползни в районе слияния врезов (объем каждого был не менее 100 тыс. м³). Плотность образовавшейся селевой массы и расход селя были настолько большими, что слияние селя с водами р. Малая Алматинка не только не приводило к частичному распаду селевой массы, но и развитию селевого процесса вплоть до конуса выноса [41].

А.Ф. Вержбицкий 14 июля 1921 г. наблюдал, как желтая вода р. Сарысай сливалась с голубоватой водой р. Малая Алматинка. Это позволяет предположить, что по руслу р. Малая Алматинка, выше устья р. Сарысай, прошел только паводок. Возможно, очаг Чертового ущелья дал лишь небольшой селевой вынос, который отложился в основном на конусе выноса ручья. По данным лихенометрии, селю имел место в Чертовом ущелье и Горельнике. Отложения на конусе выноса Чертового ущелья прослеживаются до устья этого ручья. Следовательно, можно предположить, что Чертово ущелье принимало незначительное участие в питании главного потока. Отложения селя 1921 г. в бассейне р. Горельник отмечены от метеорологической станции Верхний Горельник до его устья [39].

По свидетельству очевидцев, селевой катастрофе в г. Верный предшествовало резкое увеличение расхода воды в р. Малая Алматинка. Это позволяет утверждать, что мощное селеобразование произошло со сдвигом во времени относительно паводка, сформировавшегося в бассейне р. Малая Алматинка в результате выпадения интенсивных осадков. О том, что селю предшествовал паводок, свидетельствует следующее. Бывший хозяин пивоваренного завода Иванов, находившийся с семьей 8 июля в дачном доме в 2,5 км выше города на ле-

вой стороне р. Малая Алматинка, «... видел появившиеся в саду ... ручейки ... Через несколько минут ручейки слились в один поток ... вода поднималась ...». Иванов решил перебраться в более безопасное место, но был сбит и унесен потоком. Жена, оставшаяся в доме спаслась, поскольку через некоторое время поток стал ослабевать и дом выдержал его напор [40]. Возможно, расход паводка был таким большим, что в результате эрозии русло р. Малая Алматинка углубилось настолько, что последующим селом дом не был разрушен.

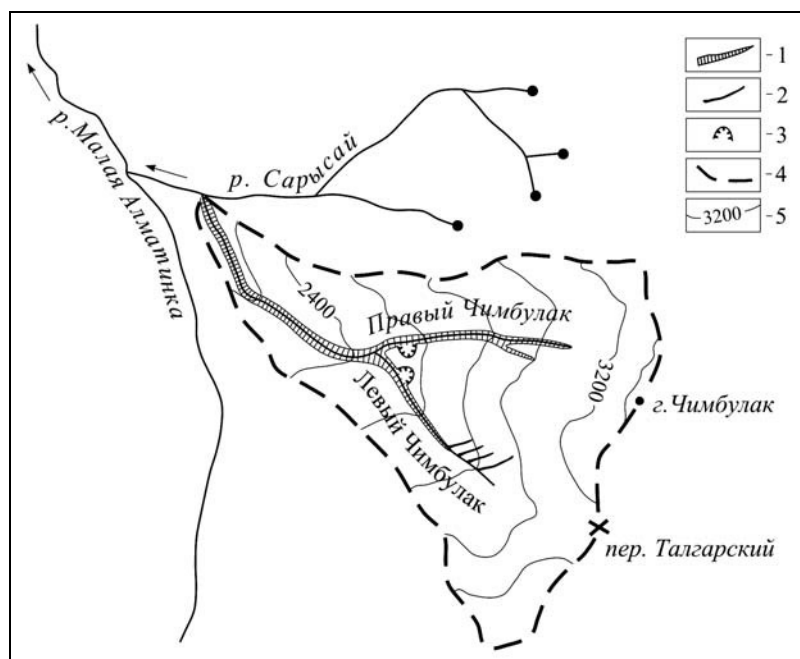


Рис. 57. Бассейн р. Чимбулак – место зарождения села 1921 г.
1 – врез, 2 – рытвина, 3 – оползневая ниша, 4 – водораздел,
5 – горизонтали.

«За дачами настал грозный час и для города, но на его счастье, бурный поток выше военных лагерей прорвался в старое русло, занятое р. Весновка и бросился на город двумя путями, повредив главным образом восточную часть города. Восточный проток двинулся по действовавшему руслу р. Малая Алматинка; в районе нижних дачных участков, до южной границы города, он был сдержан высокими берегами, и только в ближайшей полосе русла произвел разрушения, выйдя кое-где из берегов ... Перед самым городом, вследствие понижения берегов и сужения русла, ... водяной паводок с огромной силой бросился на город, снова разорвавшись на два рукава ...» [40].

«Восточный рукав ... прошел по руслу р. Малая Алматинка. Больших разрушений он не причинил ...». Однако, имеющееся описание свидетельствует, что селя имел высокую плотность и большой расход. «... Иванова течение стремительно унесло в русло Алма-Атинки. Он плыл ... на камнях в густой грязи, среди временами поднимающихся и опускающихся вырванных с корнем деревьев и, только проплыв около 9 км через весь город, Большую и Малую Алма-Атинские станицы, он, ниже последней, был вынесен потоком на берег ...» [40]. То, что Иванов унесенный водным потоком, плыл в дальнейшем «... на камнях в густой грязи ...» можно объяснить тем, что в русле р. Малая Алматинка его догнал селевой вал. О высокой плотности селевой массы и большом расходе потока свидетельствует то, что Иванову удалось остаться в живых находясь в грязекаменном потоке. Крупные камни плыли в потоке не переворачиваясь, так как не касались дна русла. Перемешивание в потоке было незначительным, поскольку скорость потока была относительно небольшой.

«Западный рукав этого потока направился по небольшому логу (старое русло р. Малая Алматинка) ... Здесь поток, не имея готового русла, захватил пространство метров в 200 в ширину и, поднявшись в высоту на 3 метра, всей своей сокрушительной силой обрушился прямо на жилые городские строения пересекая первые кварталы между проспектом Ленина (ныне Достык) и Капальской (ныне Кунаева) улицы по диагонали» [40] (рис. 58).



Рис. 58. Отложения селя 1921 г. на улице Капальской (ныне Кунаева).

«Грязь широким слоем разливалась всюду наполняя собою соседние дворы, улицы ... Исковеркав три верхних квартала в южной части города, поток с угла Госпитальной (ныне Жамбыла) и Капальской улиц повернул вдоль Капальской ... Удары камней сыпались как град. Валились постройки, деревья. Воздух оглашен был необычайным для города шумом реки, лязгом железа разбитых крыш и отчаянными воплями о помощи несчастных жертв катастрофы ... За парком (ныне имени 28-ми гвардейцев-панфиловцев) ... главный поток, с угла Капальской и Торговой (ныне Жибек жолы) улиц стал ослабевать, так как отсюда начинаются его мощные отложения крупных валунов вдоль всей улицы (рис. 59). Наибольшее скопление их оказалось ... на углу Гостинодворской (ныне Алимжанова) ... Отложения эти оканчиваются около северной границы города и за нее поток вынес лишь более мелкие речные валуны и главным образом грязь с материалами от разбитых построек» [40].

«Кроме главного потока по Капальской улице, через некоторые части города прошли еще и второстепенные боковые потоки ... Из них можно отметить поток по Пушкинской (ныне Пушкина) улице, другой получился путем прорыва главного потока по Капальской улице через ограду окружного музея» [40].

«... сравнительно благополучно отделалась западная часть города, куда от бывших лагерей двинулась часть потока по руслу реки Весновка. Главная масса камней не дошла до города, отложившись к югу от него. В городе поток прошел по Гончарной (ныне Муратбаева) улице, по вновь проделанному им руслу» [40].

Всего от катастрофы погибло и пропало без вести около 500 человек. Ранено 80 человек. Общее число пострадавших – 500 семейств (составом до 3000 человек), т.е. около 7 % всего населения города. Разрушено 65 домов, повреждено 82, разрушено хозяйственных построек 174, повреждено 63. Разрушено и унесено 18 мельниц, одна пасека, одна табачная фабрика, два кожевенных завода. Домашних животных погибло до 500 голов, не считая птицы [40].

Селеобразование носило массовый характер: сели прошли почти во всех бассейнах северного склона Заилийского Алатау. Самый мощный сель сформировался в бассейне р. Малая Алматинка. Ю.Б. Виноградов [23], ссылаясь на данные экспедиции, проводившей работы сразу после катастрофы, писал «... общее количество перемещенной грязекаменной массы оценивается приблизительно в 2 млн. м³ ...». А. Медеу и его соавторы [75] оценивают объем селя 1921 г. в 3,5 млн. м³. В работе Е. Дуйсенова [44] приведены данные различных авторов, по мнению которых объем селя составлял от 1,6 до 3,2 млн. м³. К сожалению, в перечисленных работах не говорится о том, где произошло отложение селевых масс, а оно могло иметь место от Медеу до северных окраин г. Верный [158]. Значительный объем селевой массы мог быть вынесен за пределы конуса выноса по руслам рек Малая Алматинка и Весновка.

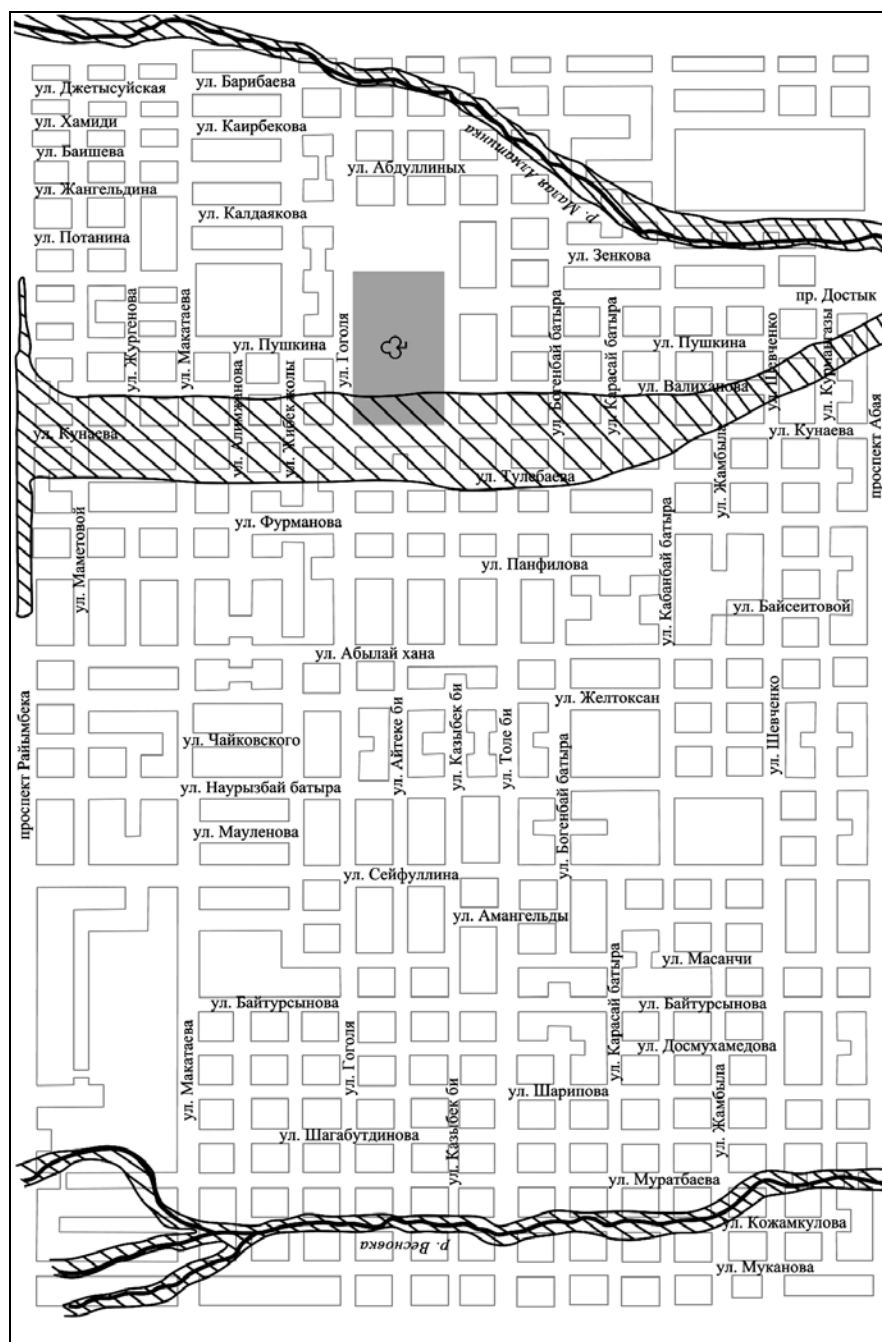


Рис. 59. Схема движения селевого потока 8 июля 1921 г. по г. Верный (названия улиц на схеме современные). Заштрихованные участки показывают территорию города, подвергшуюся воздействию селея.

4.5. Сель 16 мая 1947 года

Ливневой дождь 16 мая 1947 г. привел к формированию селей различной мощности: от бассейна р. Каскелен (на западе) до бассейна р. Каратурук (на востоке). Сильные осадки выпали в среднегорной и низкогорной зонах (Каскелен – 62,5 мм, Алматы – 78,2 мм, Медеу – 55,9 мм, Талгар – 181,7 мм, Тургень – 73 мм).

Катастрофический сель сформировался в среднегорной и низкогорной зонах бассейна р. Талгар. По словам очевидца этих событий Е.И. Колесникова, события развивались следующим образом. Редкие капли дождя сменились «... сплошной стеной воды белесого цвета, за которой в двадцати метрах не видно было соседнего дома». Ливень продолжался около полутора часов, затем он сменился сильным дождем. «... Тут в дом ворвался промокший насквозь брат и закричал восторженно – наводнение ! ... Мы бросились к окну ... грязно-косматый, клокочущий вал накрыл карагачи ... под проливным дождем, босоногие и простоволосые, бегут люди в одиночку и семьями, несут в руках и на спине какие-то узлы, гонят и волокут на веревках свиней, коров. Сквозь шум дождя слышны крики, плач детей, ругань, рев скотины. Паника. ... все обезумели. ... Этот сильнейший ливень и вызванные им селевые потоки унесли в нашем поселке и в окрестностях 18 человеческих жизней. ... Были разрушены дороги, мосты, жилища, заилены и смыты посевы и огороды» [64].

По словам Е. Дуйсенова «... Значительному разрушению подверглись долины рек Иссык, Тургень, Большая и Малая Алматинки, Аксай и Каскелен. Эти сели нанесли большой материальный ущерб народному хозяйству и были причиной человеческих жертв» [44].

4.6. Сель 8 июля 1950 года

В результате ливня сели сформировались в бассейнах рек Каскелен, Аксай, Большая Алматинка. Катастрофический характер имел сель в бассейне р. Большая Алматинка. В день, предшествовавший катастрофе, в 17 ч 30 мин начался дождь, продолжавшийся до 8 ч утра. После 5 ч перерыва дождь возобновился на 2 ч и вновь прекратился. В 20 ч начался ливень, длившийся 20–25 мин. По данным С.П. Кавецкого, в районе Большого Алматинского озера осадки составили 40 мм, в центре дождя, по косвенным данным, в течение часа выпало около 60 мм [54].

О чрезвычайной интенсивности выпадения осадков в бассейне р. Кумбель свидетельствуют данные Н.Ф. Колотилина, полученные после прохождения села «... Уже примерно через полчаса вода пошла сплошным потоком даже по

травянистому склону. ... Подобное редкое явление одновременного склонового стока на достаточно широком фронте, видимо, находит свое объяснение в быстром таянии снега под влиянием ливневых осадков» [75].

Мнение о значительном увеличении стока при выпадении дождя на лед и снег довольно распространено. Однако это не находит физического обоснования. Как известно, теплота плавления льда составляет 79,4 кал/г, а теплоемкость воды – 1 кал/г-град. Следовательно, даже если температура капель дождя будет 5 °С и вся теплота будет затрачена на плавление снега (льда), то сток увеличится максимум на 6 %.

Со слов очевидцев, первый селевой вал сформировался в бассейне р. Аюсай. Последующие валы проходили с интервалами около 30 мин. Наиболее мощным был второй вал, сформировавшийся, скорее всего, в бассейне р. Кумбель. Общая продолжительность селя составила около 2 ч. Движение селевого потока по долине сопровождалось частичным распадом селевой массы: отложение наиболее крупных фракций (2,5–9,0 м) началось в устье р. Кумбель, фракций 1,5–1,7 м – в среднем течении р. Большая Алматинка и 0,3–0,7 м – в верхней части конуса выноса [75]. Изменение гранулометрического состава твердой составляющей селя по мере его движения можно объяснить только относительно низкой плотностью селевой массы. Расход селя в устье р. Кумбель был близок к 1000 м³/с, а у г. Алматы – 100 м³/с, объем селя составил около 1,5 млн. м³ [54].

При расчете характеристик селя авторами отчета «Исследование селевого паводка, прошедшего 8–9 июля 1950 г. в бассейне р. Б. Алматинка» плотность селевой массы априори была принята равной 1300 кг/м³, объем жидкого стока – 1 128 000 м³, максимальный жидкий расход паводка – 356 м³/с, коэффициент стока – 0,8. Вычисленное значение максимального расхода «селевого паводка» в устье р. Кумбель составляло 970 м³/с (с учетом «заторности»), объем твердого стока – около 300 000 м³, а общий объем «селевого паводка» – 1 428 000 м³ [54].

Современный уровень знаний о механизмах формирования селей, фактические данные о прошедших катастрофических селях на северном склоне Заилийского Алатау позволяют утверждать, что плотность селя 1950 г. находилась в пределах 2350–2400 кг/м³. Следовательно, при объеме жидкого стока равном 1 128 000 м³ объем селя должен был превышать 6,3–7,5 млн. м³, а максимальный расход селя – 4000–4800 м³/с при расходе водного паводка 356 м³/с. Эти значения намного превышают величины, полученные по следам, оставшимся в русле после прохождения селя. Следовательно, предположения о масштабах водного паводка, сформировавшего селя 1950 г., неверны. Утверждение о плотности селя, превышающей 2350 кг/м³, подтверждается и размерами глыб, входивших в состав селевой массы (рис. 60).

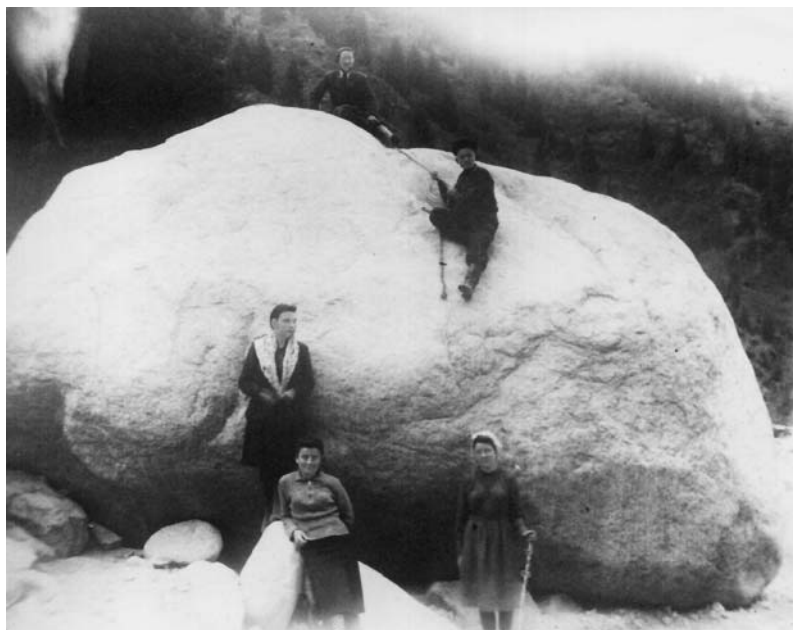


Рис. 60. Одна из глыб, оставшаяся в русле р. Большая Алматинка после прохождения селя 1950 г.

Во время прохождения селя погибли люди. Ущерб, причиненный селом, был значительным: «разрушены водозаборы, плотины и напорные трубопроводы у семи гидроэлектростанций; завален приемник горводопровода, разрушена часть поселка ГЭС-1 и несколько домов в других местах, уничтожено несколько автомашин и один трактор; разрушены четыре бетонных моста, шоссейная дорога, высоковольтная линия и линия связи на протяжении около 10 км, уничтожено около 400 голов скота» [44].

4.7. Сель 7 июля 1963 года

Селевой очаг Жарсай в 20 веке являлся главным селевым очагом в бассейне р. Иссык. Он представляет собой мощный селевой врез на фронтальном уступе древней морены, состоящий из двух частей: правого (орографически) вреза, образовавшегося в результате эрозионно-сдвигового процесса, и левой воронки, образовавшейся в результате сдвигового процесса (рис. 61).

Сели в верховьях р. Жарсай формировались в 1958, 1963 и 1977 гг. Их причиной был прорыв одного и того же водоема. Вода накапливалась в термокарстовой котловине на языке Жарсайского ледника, когда внутриледниковый канал стока перекрывался. Сель 7 июля 1963 г. был катастрофическим в значи-

тельной мере благодаря тому, что опорожнение водоема происходило по каналу, разработанному еще в 1958 г.



Рис. 61. Селевой очаг на древней морене в верховьях р. Жарсай.

Научных публикаций, посвященных Жарсайским селям 1958 и 1963 гг., немного. В ряде работ роль прорывных вод в образовании селей отрицается. Первая публикация, в которой опорожнение водоема называлось главной причиной формирования селя 1958 г., принадлежит А.Ф. Литовченко [68]. Однако еще в 1959 г. А.С. Зинченко и И.И. Митьков, обследовавшие следы селя 1958 г., указывали на наличие меток уровня воды в опустевшей котловине, следов прохождения мощного прорывного паводка. По их мнению, прорыв озера произошел через грот [86].

Объем селя 1958 г. составил 4 млн. м³ [97]. В результате прохождения селя существенных изменений размера озера Иссык и его перемычки не произошло. Сель 6 июля 1958 г., несмотря на значительные характеристики, не нанес большого ущерба, так как отложился в озере Иссык лишь частично. Селевая масса в основном отложилась на конусе выноса, примыкающем к озеру.

В 1963 г. термокарстовая котловина на языке Жарсайского ледника вновь заполнилась водой в результате очередной закупорки внутриледникового канала стока. «... синоптическая ситуация днем 7 июля была такова, что ливневые дожди могли быть только локальными и небольшими по слою. Косвенно это

подтверждается данными наблюдений в соседних пунктах. Так, например, в поселке Иссык осадков не было совсем, в Медео выпало 2 мм осадков, а в урочище Мынжилки – 6 мм» [44]. Поэтому маловероятно, что дождь [65] в верховьях р. Жарсай мог стать причиной опорожнения водоема (по внутриледниковому каналу стока) на морене ледника Жарсай. Скорее всего опорожнение было обусловлено термокарстовыми процессами во внутриледниковом канале стока, как это было в 1958 г., а затем и в 1977 г. Катастрофическое опорожнение моренного озера происходило через ледовый туннель в озерной перемычке и далее, поверхностным путем, в селевой врез. Часть морены, где образовалась воронка, обводнялась по подземным каналам стока.

Сель 1963 г. формировался как в результате эрозионно-сдвигового процесса (врез), так и в результате сдвигового процесса, в ходе которого образовалась воронка на древней морене ледника Жарсай. Максимальный расход селя составил 7–12 тыс. м³/с, объем – 5,8 млн. м³, плотность селевой массы была близка к 2400 кг/м³ [51].

Сель входил в озеро Иссык в течение 4 часов 12 валами, отдельные из которых были высотой 3–4 м [68]. Образование волн (высотой до 5,5 м) на поверхности озера [51], в совокупности с увеличением его уровня, привели к разрушению озерной перемычки. Максимальный расход прорывного паводка оценен в 500–800 м³/с. Озеро с объемом более 18 млн. м³ было сработано полностью в течение нескольких часов. Мощный сброс воды из озера привел к формированию наносоводного селя в ниже расположенной части долины р. Иссык. Его максимальный расход был около 1000 м³/с [68].

Сель 1963 г. имел катастрофические последствия. По свидетельству И.Г. Аушева [55], бывшего директора турбазы «Иссык», погибло 52 человека, отдыхавших в окрестностях озера Иссык. Значительным был и материальный ущерб: в г. Иссык (ныне г. Есик) уничтожено полностью две улицы. Опорожнение озера привело к исчезновению естественного селехранилища, защищавшего г. Иссык на протяжении тысячелетий.

4.8. Сель 15 июля 1973 года

Большой ущерб, нанесенный г. Верный селом 1921 г., а также то, что озера моренно-ледниковых комплексов в первой половине 20 века еще не представляли реальной опасности, стали причиной узкой направленности проектирования селезащитных мероприятий – защитить г. Алматы от селей дождевого генезиса. Однако события 1958, 1963 гг. в бассейне р. Иссык показали, что угроза селей гляциального генезиса может даже превосходить угрозу селей дождевого генезиса. Моренное озеро на леднике Туюксу еще в 60-е годы 20 века рассмат-

ривалось как представляющее большую селевую опасность. Для предотвращения угрозы гляциального селя в бассейне р. Малая Алматинка в 1964 г. на морене ледника Туяксу на высоте около 3400 м началось строительство сифонного водосброса с целью предотвращения прорыва моренного озера № 2 [45].

В период 1964–1966 гг. была построена серия гидротехнических противоселевых сооружений: габионная плотина в урочище Мынжилки, сквозные сооружения выше проектируемой плотины в Медеу и в районе дома отдыха № 2 Совета Министров КазССР. В 1966 г. началось строительство плотины в урочище Медеу. Все это, а также организационно-финансовые трудности эксплуатации сифонов, привело к тому, что эксплуатация сифонов в начале 70-х годов была прекращена. Озеро № 2 продолжало развиваться и к 15 июля 1973 г. его объем достиг 260 тыс. м³.

Сель 1973 г. – единственный катастрофический гляциальный сель, который был спрогнозирован. Р.С. Голубов, на основе рассмотрения метеорологических ситуаций, наблюдавшихся перед прохождением селей в бассейнах рек Малая Алматинка и Иссык, установил, что селям предшествовала большая высота нулевой изотермы (>4800 м) и высокая среднесуточная температура воздуха на высоте 3000 м (>8 °С) за 10-дневный период, предшествующий критической высоте нулевой изотермы [35]. 13 июля 1973 г. нулевая изотерма находилась на высоте 4800 м, а среднесуточная температура воздуха за 10-дневный предшествующий период составила 8,8 °С. По прогностическим данным в ближайшие сутки температура воздуха на высоте 3000 м должна была остаться в тех же пределах, а нулевую изотерму следовало ожидать на высоте 5300 м. Был дан прогноз: ожидается сель. 15 июля 1973 г. в бассейне р. Малая Алматинка сформировался катастрофический сель [33].

Информация о событиях, предшествовавших катастрофе, была получена от сотрудников сектора географии АН КазССР П.А. Судакова и П.А. Плеханова. «В первой половине дня 15 июля был зафиксирован поверхностный перелив из озера № 2 в озеро № 3, несмотря на то, что уровень воды в озере № 2 на 35–40 см не достиг своего максимального положения 1971 г. ... К 15 ч расход перелива визуально оценен в 0,2–0,3 м³/с» [24]. В 17 ч 54 мин разрушение перемычки между озерами № 2 и № 3 приняло катастрофический характер. По мнению авторов [75], просадка перемычки, вследствие которой и произошло катастрофическое увеличение расхода паводка, была обусловлена обрушением свода внутриморенного канала стока. По данным Ю.Б. Виноградова, максимальный расход прорывного паводка составил около 350 м³/с, а объем – 225 тыс. м³ [24]. Сель, сформировавшийся на фронтальном уступе современной морены, практически распался в троговой долине на подходе к габионной плотине в урочище Мынжилки. Поскольку емкость, образуемая плотиной, составляла менее 15 % от объема прорвавшегося озера, плотина была разрушена в течение 3 мин. Водный поток устремился по

руслу р. Малая Алматинка, проходящему по селевому врезу с уклоном от 14 до 8°, равномерно уменьшающемуся вниз по течению, обогащаясь рыхлообломочным материалом. На своем 8-километровом пути, который селевой поток преодолел за 12–13 мин (скорость потока 10–11 м/с), он углубил русло на 12–15 м (местами до 40 м). Сель, разрушил на своем пути две сквозные плотины [24].

По мнению Б.С. Степанова (устное сообщение), сквозная плотина, расположенная в районе турбазы «Горельник», сыграла роковую роль в судьбе группы туристов, находившейся в складском помещении на берегу р. Малая Алматинка (рис. 62). Из-за того, что при ударе селевой волны разрушение сквозной плотины не было мгновенным, в результате подпора уровень потока поднялся примерно на 10 м. Селевая масса, перелетев через гребень плотины, обрушилась на складское помещение и раздавила его. В это же время плотина была снесена и селевой вал прошел вниз по долине. Скорее всего при отсутствии плотины люди бы не погибли. В момент удара волны селя о плотину, в результате сжатия ее фронтальной части, произошел выброс глыб и камней. Дальность разлета камней достигала 70–100 м. При их падении на территорию турбазы погиб один человек. Шиферная крыша двухэтажного здания, находившегося на расстоянии более 50 м от плотины, была похожа на решето. Наиболее крупная глыба, весом не менее одной тонны, упала на жилое помещение, располагавшееся на расстоянии 15–20 м от потока и на 8–10 м выше гребня плотины.

«В 18 ч 15 мин грязекаменный вал 15-метровой стеной в грохоте и грязевом облаке обрушился в селехранилище» с расходом около 10 тыс. м³/с, объемом 3,8 млн. м³ и плотностью селевой массы 2390 кг/м³ [24]. Важно отметить, что на своем пути сель обогащался не только рыхлообломочным материалом, но и водой различного генезиса, основную часть которой составляла поровая вода (455 тыс. м³) [24]. Объем поровой воды, вовлеченной в селеобразование, в 2 раза превысил объем воды, поступившей из озера. В результате этого объем селя увеличился примерно в 3 раза.

Сель 1973 г., образовавшийся в результате взаимодействия водного потока с рыхлообломочной породой, подтвердил результаты эксперимента по искусственному воспроизведению селевых потоков на Чемолганском полигоне, проведенного в 1972 г. Было установлено, что турбулентный режим движения потока сохраняется до значений концентрации твердой составляющей в селевой массе, на много превышающих представления о ней, существовавшие ранее [7, 15, 30]. Именно это и обуславливает возможность образования селевой массы с плотностью более 2400 кг/м³. Это в свою очередь приводит к тому, что единичный объем воды трансформируется не в 2 объема селевой массы, как представлялось ранее, а в 6–7 и даже более, что в корне изменило представления о механизмах образования селевой массы большой плотности.



Рис. 62. Остатки сквозной плотины на р. Малая Алматинка у турбазы «Горельник».

Стало очевидным, что недостаточная емкость плотин, предназначенных для аккумуляции водных паводков, возникающих при прорыве водоемов моренно-ледниковых комплексов, в определенных ситуациях (их катастрофическое разрушение) может привести к формированию селя. Изменились представления и об аккумулярующей способности сквозных плотин. Почти мгновенное разрушение 2 сквозных металлических плотин свидетельствует о том, что подобные сооружения не способны противостоять мощным селям.

Измерение характеристик поверхности отложений селевой массы в селехранилище, образованном плотиной в Медеу, показало, что уклон уравнильной поверхности на расстоянии 350 м от плотины (средняя глубина 50 м) не превышал $0,3^\circ$; на участке 350–450 м (средняя глубина 40 м) – был близок к $0,7^\circ$; на участке 450–550 м (средняя глубина 30 м) – увеличился практически до 1° и лишь на последующих 200 м (средняя глубина меньше 20 м) – увеличился почти до 2° [85]. Установление факта формирования незначительных уклонов уравнильной поверхности при глубине отложений, превышавших первые десятки метров, имеет важное значение при проектировании селезащитных сооружений. Теоретическое объяснение этому дано Б.С. Степановым [117, 118].

После селя 1973 г. угроза селей гляциального генезиса была осознана в полной мере. Говоря о людских потерях Первый секретарь коммунистической

партии Казахстана Д.А. Кунаев сказал: «Мы никогда не узнаем, сколько точно погибло: горы были полны людей, воскресенье ... Могу только не для печати сказать, сколько поднято, вывезено погибших. Ровно семьдесят человек ...» [56]. Плотины в урочище Медеу «... в данном случае исполнили роль абсолютного оружия. Не хочется думать о последствиях, которые мог бы причинить селевой поток нижележащим долине и городу» [24]. Селехранилище было заполнено селевой массой примерно на 60 %.

4.9. Сели 3–4 августа 1977 года

Причиной формирования селя 3 августа 1977 г. в бассейне р. Кумбель было опорожнение озера № 13, расположенного на современной морене ледника Советов на высоте 3400 м. Озеро считалось опасным (его объем за 5 лет с 1969 по 1974 гг. увеличился на 82 тыс. м³ и к моменту прорыва составлял 89,6 тыс. м³), поэтому в период 1974–1977 гг. Казглавселезащитой осуществлялся комплекс мероприятий по частичному опорожнению этого озера [113]. По данным [4], «в течение 1976–1977 гг. никаких мелиоративных работ на морене ледника Советов не проводилось».

В результате разрушения перемычки озера № 13 из него было сброшено 74,5 тыс. м³ воды в течение 1 ч 25 мин. Средний расход воды через проран озерной перемычки составил 15 м³/с, а максимальный – превысил 30 м³/с [96]. Сель, образовавшийся на современной морене, распался в основном в троговой долине, расположенной выше селевого вреза. Водная составляющая селя, содержащая в своем составе незначительное количество взвешенных частиц, поступила в селевой врез. Врез располагался в высотном интервале 2565–2920 м и имел протяженность около 1100 м, средний продольный уклон – 19°, угол наклона бортов вреза – 28–35°, до начала селеформирования его глубина достигала 100–150 м. Низкая степень консолидации грунта морены способствовала вовлечению рыхлообломочного материала в селевой процесс и, как следствие, быстрому углублению вреза и обрушению его бортов. Высокая естественная увлажненность моренного грунта в значительной степени препятствовала уменьшению эродирующей способности селевого потока. По этой причине расход селя быстро увеличивался и на выходе из вреза достигал значений, превышавших 1000 м³/с [96].

Селевой процесс характеризовался нестационарностью, обусловленной как собственно селевым процессом, так и случайным характером места и объема обрушений бортов вреза. Следствием этого было формирование большого числа волн (валов) [121]. Из-за больших значений предельного напряжения сдвига селевой массы (плотность селевой массы превышала 2400 кг/м³) движение селя в долине р. Большая Алматинка становилось возможным, когда глубина селево-

го потока превышала 2–3 м. Вследствие этого поток двигался крайне неравномерно: при прохождении очередного селевого вала по поверхности остановившейся селевой массы она вовлекалась в движение, приобретая скорость 3–4 м/с. По мере распластывания движущейся селевой массы ее скорость уменьшалась до нуля. 3 августа фронт селевого потока достиг места слияния рек Проходная и Большая Алматинка, где сел и остановился [96].

После завершения опорожнения озера селевой процесс во врезе прекратился, так как расход воды в р. Кумбель был ниже критического. После слияния рек Кумбель и Озерная, на участке долины р. Большая Алматинка до ГЭС-2, вода текла по поверхности остановившейся селевой массы. Взаимодействие водного потока с селевой массой приводило к ее разжижению и образованию вторичного селя, формировавшего русло в селевых отложениях. По визуальным оценкам расход вторичного селя, перемещавшегося ниже ГЭС-2 по руслу р. Большая Алматинка, был близок к $60 \text{ м}^3/\text{с}$. Этот сел достиг г. Алматы и отложился в озере Сайран [66].

4 августа около 3 ч в селевом врезе вновь образовался сел. Толчком к его образованию послужило, скорее всего, обрушение одного из бортов вреза. Движение селевого вала по поверхности остановившейся селевой массы и вовлечение в селевой процесс воды р. Большая Алматинка привели к лавинообразному возрастанию расхода селевого потока. При подходе к месту слияния рек Большая Алматинка и Проходная расход селевого потока, перемещавшегося со скоростью близкой к 10 м/с, составлял около 10 тыс. $\text{м}^3/\text{с}$. Далее, резко теряя мощность, селевой поток достиг озера Сайран, где селевая масса и отложилась [96]. Объем селя 4 августа 1977 г. был относительно небольшим. Он отложился на участке 300–400 м от фронта селя, остановившегося 3 августа. Суммарный объем наносов, вынесенных в период 3–31 августа, по разным оценкам, составил 3–3,2 млн. м^3 [96] и 2,4 млн. м^3 [88].

После прохождения селей 1977 г. врез претерпел существенные изменения и превратился в труднодоступный каньон с крутыми, почти отвесными бортами, достигающими высоты 80 м. В бортах вреза образовались многочисленные ниши обрушения. Углубление вреза и обрушение его бортов привело к выходу на дневную поверхность подземных источников. Селевые выбросы отмечались в течение месяца. Причиной их образования были относительно небольшие обрушения бортов вреза: падая, блоки морены разрушались и перекрывали прирусловую зону. Высокая степень пористости обрушившихся масс способствовала быстрому насыщению их водой реки и, как следствие, развитию сдвигового селевого процесса, трансформировавшегося в эрозионно-сдвиговый по мере движения селевой массы во врезе.

Сель 1977 г. нанес большой ущерб: погибли люди, были повреждены автодороги, мосты, линии высоковольтной электропередачи, гидротехнические со-

оружения, хозяйственные и жилые постройки, нарушено водоснабжение г. Алматы [4].

4.10. Сель 28–29 января 1988 года

Селевой поток в песках Жаманкум образовался в результате прорыва аварийного накопителя сточных вод г. Алматы. Существует несколько гипотез о причинах прорыва накопителя. Однако грубое нарушение правил его эксплуатации, безусловно, является наиболее вероятной. В качестве накопителя использовалось естественное понижение в песках. При максимальном рабочем заполнении длина водоема составляла около 6 км, ширина – 1–1,2 км, максимальная глубина – около 10 м, объем – 29,4 млн. м³. Прорыв накопителя произошел в конце января при температуре воздуха около 20 °С ниже нуля в результате превышения проектной (предельно допустимой) отметки заполнения на 0,85 м. К этому времени в водоеме накопилось около 36 млн. м³ воды. Большая часть водной поверхности накопителя была покрыта льдом толщиной 0,2–0,25 м. Свободной ото льда оставалась поверхность той части накопителя, где он соединялся с каналом, по которому сточные воды текли в накопитель Сорбулак. Накопитель располагался в толще верхнечетвертичных современных эоловых отложений, представленных мелким песком и насыщенным водой в зоне, прилегающей к водоему [87, 145].

Прорыв накопителя произошел по направлению к пойме р. Каскелен, расположенной в 6,5 км восточнее места разрушения перемычки. Относительное превышение перемычки накопителя над местом впадения прорывных вод в р. Каскелен составляло около 87 м. Рельеф местности между накопителем и р. Каскелен представлял собой ступенчатое барханное пространство, характерной особенностью которого являлось наличие значительных по размерам отрицательных форм рельефа. В результате прорыва накопителя образовался проран глубиной более 6 м, через который на начальной стадии происходило опорожнение с максимальным расходом 50–70 м³/с. Значительный расход прорывного паводка привел к быстрому заполнению впадин и выходу потока в пойму р. Каскелен. В ходе заполнения впадин расход воды, изливавшейся через проран, изменялся незначительно, поскольку увеличение ширины прорана компенсировалось понижением уровня воды в накопителе. Это подтверждается наблюдениями за расходом воды в р. Каскелен, увеличившимся примерно с 10 (бытовой расход) до 60 м³/с [145]. Значительно энергичней протекали процессы эрозии там, где барханы вплотную подступали к пойме р. Каскелен. Течение воды на больших уклонах привело к формированию каньона, отступавшего в глубь барханов со средней скоростью 8 см/с.

Малые энергетические затраты, связанные с переносом твердой составляющей селевой массы (песка) во взвешенном состоянии (при плотности более

1900 кг/м³), обусловили незначительный уклон тальвега образующегося каньона (около 0,5°) [121]. Благодаря этому каньон подступил к начальному прорану с высотными отметками дна меньшими, чем отметки дна накопителя. Это привело к резкому увеличению расхода воды, истекавшей из накопителя, и формированию селя с расходом 1500–2500 м³/с (на выходе из каньона) и плотностью селевой массы 1900±20 кг/м³. В ходе селевого процесса образовался каньон длиной 10,6 км, шириной 110–240 м, глубиной до 53 м [145].

По мере движения в пойме р. Каскелен селевая масса постепенно распадалась, о чем свидетельствует уменьшение мощности отложений песка с 10,2 м (место впадения селя в р. Каскелен) до 1,5 м в 6,5 км ниже по течению реки и 0,3–0,4 м в районе впадения р. Каскелен в Капчагайское водохранилище. Объем селя составил 72,5 млн. м³, из них 36,5 млн. м³ песка [145].

В результате формирования селя, вызванного прорывом накопителя сточных вод Жаманкум, нанесен большой ущерб: погибли люди, произошло загрязнение окружающей среды, разрушены автомобильные и железнодорожные мосты, полотно дорог, примыкающих к ним, на несколько суток прервано железнодорожное и автомобильное сообщение [146].

Сель в песках Жаманкум подтвердил основные положения теории существования селей, указывающей на возможность (при определенном гранулометрическом составе селеформирующих грунтов) формирования селей с высокой плотностью (при малых энергетических затратах) и движения их без распада на уклонах менее 1°. Стало очевидным, насколько чувствительна природа к антропогенным воздействиям.

4.11. Сель 5 января 2006 года

5 января 2006 г. (20–22 ч) на р. Узункаргалы наблюдалось мощное водоледовое явление. Судя по объему снежноледовых масс (10–15 тыс. м³), отложившихся в верхнем бьефе селезащитной плотины, формирование водоледового потока началось в 1–1,5 км выше плотины. Плотина расположена в 3,5–4 км выше выхода р. Узункаргалы из гор. Снежноледовая масса, спрессовавшаяся в момент удара о решетки водоприемного устройства, перекрыла его 4 нижних окна (рис. 63, 64). Началось заполнение селехранилища водой. Снежноледовая масса всплыла, создав условия для выхода воды из селехранилища. При этом расход воды, судя по уровню высоких вод в русле реки в нижнем бьефе, был не ниже расхода ординарных паводковых вод в весенне-летний период времени. Это вновь привело к формированию водоледового потока на ниже расположенном участке реки.



Рис. 63. Водоприемное устройство селезащитной плотины на р. Узункаргалы (вид с верхнего бьефа) (фото автора).



Рис. 64. Снежноледовые отложения (мощностью более 3 м) в верхнем бьефе плотины (фото автора).

Неоднократное прерывание гидротехническими сооружениями процесса образования водоледового потока привело к значительному снижению ее расхода на выходе из гор (рис. 65). Однако расход потока оказался достаточным для того, чтобы проломить брешь в железобетонном заборе суконной фабрики длиной около 20 м. Судя по тому, что поток прошел практически без задержки в подмостовом отверстии автомобильной дороги в верхней части поселка Фабричный, на территории фабрики произошло отложение значительной части снежноледовой составляющей потока.



Рис. 65. Перехват снежноледовых масс вододелителем (фото автора).

Ниже автомобильного моста произошло очередное нарастание расхода потока и уже через 400–500 м расход достиг $150\text{--}200\text{ м}^3/\text{с}$. Скорость движения водоснежноледовой массы, при максимальном ее уровне, принята равной $1,5\text{--}2\text{ м/с}$. Если скорость движения была больше, то расход потока соответственно необходимо увеличить (рис. 66). Средний многолетний расход воды р. Узункаргалы в январе месяце – $1,73\text{ м}^3/\text{с}$ [102].

Далее, вниз по течению реки, расход потока если и уменьшался, то незначительно. В 1 км ниже пешеходного моста (см. рис. 66) водоснежноледовый вал натолкнулся на другой пешеходный мост длиной около 10 м, частично перелетел через него и, обтекая мост с обеих сторон, продвигался вниз по пойме (на этом участке русла погибли люди). Ниже этого моста, в восточной

части поймы реки, произошло частичное отложение снежноледовой массы объемом около 1200 м³.



Рис. 66. Пешеходный мост в центре поселка Фабричный (длина 33 м). Человек стоит на отметке максимального уровня водоледового потока (около 5 м) (фото автора).

Водоледовым явлением нанесен значительный ущерб: погибли люди, разрушены гидротехнические сооружения и мосты, нарушено водоснабжение.

Глава 5

ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ

Наиболее благоприятными зонами для жизни и хозяйственной деятельности человека на юге Казахстана являются узкие полосы предгорных равнин, примыкающих к склонам горных хребтов. В своем большинстве они представляют собой своеобразные шлейфы, образованные в результате слияния конусов выноса, замыкающих горные долины. Начало последнему этапу оседлой жизни на предгорной равнине, расположенной у северного склона Заилийского Алатау, положено в середине 19 века (рис. 67).

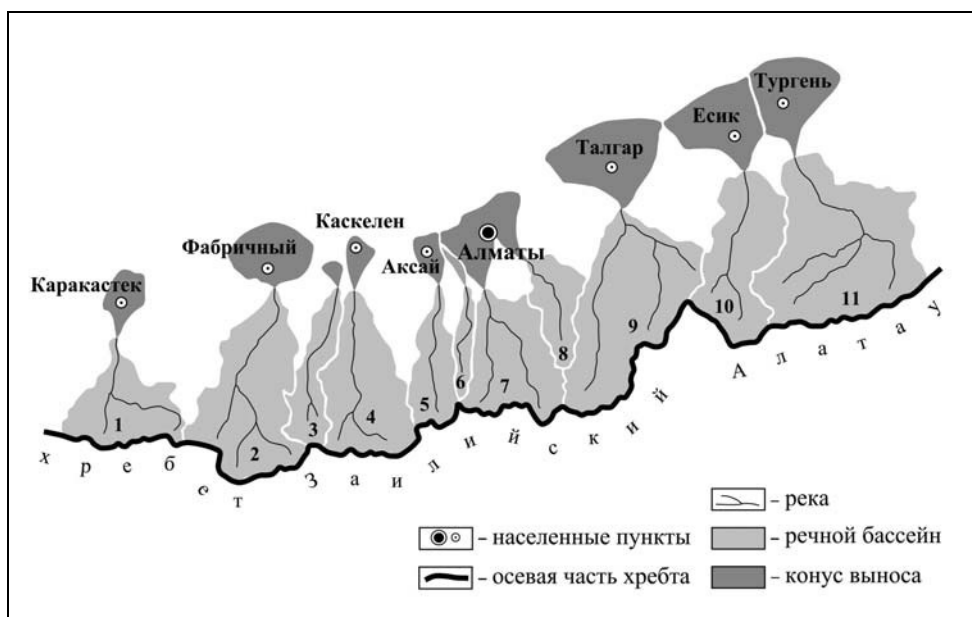


Рис. 67. Схематическая карта северного склона Заилийского Алатау. Бассейны рек: 1 – Каракастек, 2 – Узункаргалы, 3 – Чемолган, 4 – Каскелен, 5 – Аксай, 6 – Каргагинка, 7 – Большая Алматинка, 8 – Малая Алматинка, 9 – Талгар, 10 – Иссык, 11 – Тургень.

Здесь возникли поселения, впоследствии превратившиеся в крупные населенные пункты: Алматы, Каскелен, Талгар, Есик и т.д. В настоящее время на этой территории проживает около 2 млн. человек. Населенные пункты и объекты хозяйственной деятельности были заложены в период времени, приходящийся на конец Малого ледникового периода (середина 19 века) и характеризующийся слабой селевой активностью дождевого генезиса, селевая активность гляциального генезиса практически отсутствовала.

5.1. Проблема оценки селевой активности на северном склоне Заилийского Алатау

Оптимальная хозяйственная деятельность на северном склоне Заилийского Алатау и прилегающей к нему территории невозможна без учета селевой опасности. Опасность в этом регионе представляют сели дождевого, гляциального, сейсмического и антропогенного генезисов. Оценка селевой активности может осуществляться как для региона в целом, так и для отдельных селевых бассейнов. Более предпочтительна оценка селевой активности бассейна, так как обобщенный показатель, полученный для всей территории, может существенно искажать реальную обстановку в отдельных бассейнах. Так, например, сели гляциального генезиса актуальные для бассейна р. Малая Алматинка в условиях климата 20 и 21 веков, неактуальны для бассейна р. Каракастек, поскольку в этом бассейне оледенение отсутствует.

Под селевой активностью в пределах одного бассейна понимается интегральная оценка масштаба селевых явлений, характеризуемая показателями повторяемости и объема селевых выносов [94]. Однако такая оценка не дает реальной картины степени опасности пребывания людей и их деятельности, так как селевая активность может изменяться в широких пределах для различных частей селевых бассейнов.

Зоны, подверженные разрушительному воздействию селей, без учета площадей конусов выноса составляют, как правило, менее 10 % от общей площади селевых бассейнов. Остальная часть бассейнов, на большинстве специализированных карт закрашиваемая так же в цвета опасности, не селеопасна и представляет собой водосбор. При отсутствии селезащитных сооружений вся площадь конусов выноса также считается селеопасной.

Другими способами определения селевой активности являются получение приведенной селевой активности, определяемой как частное от деления суммарного объема селевых выносов за 50–100 лет на число лет, образующих отрезок учтенного времени, а также показатели относительной густоты сети селевых русел и объема селевых выносов [94]. Эти оценки вполне приемлемы для

общегеографического описания районов, подверженных воздействию селей в условиях стабильного климата. Однако их использование в условиях изменяющегося глобального климата вряд ли допустимо.

Известно, что селевые явления возникают при синхронной реализации трех факторов: геологического, геоморфологического и гидрометеорологического. История развития северного склона Заилийского 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 четвертичном периоде существенно изменялась. Своего максимума она достигла, скорее всего, в ресс-вюрмское межледниковье и была практически нулевой в периоды оледенений.

Прекращение селевой деятельности в ледниковые периоды объясняется сокращением стокообразующей площади водосборов, где ливневые осадки выпадали в жидком виде, уменьшением энергии рельефа, так как вся высокогорная область, покрытая снегом и льдом, не могла быть областью зарождения и развития селей. Значительно уменьшились в описываемый период времени и потенциальные возможности геологического фактора в средне- и низкогорной зонах, поскольку произошла трансформация ландшафтов. Высокотравные луга, характерные в настоящее время для верхней предгорной ступени, сменились хвойными лесами и редколесьем, способными как перехватывать осадки, так и препятствовать развитию эрозионных процессов, а также частично альпийскими низкотравными лугами, где осадки выпадали преимущественно в твердом виде. Максимум селевая активность достигала в периоды, когда во всех высотных зонах хребта ливневые осадки выпадали в виде дождей. Это происходило, когда температура воздуха в Антарктиде превышала современное значение на 2–3 °C [156, 166, 169].

В 2001 г. ведущие специалисты в области изменения климата многих стран мира подготовили специальный отчет, в котором подтверждается, что влияние человеческой деятельности на глобальный климат никогда не было столь значительным, как в настоящее время. Согласно новой оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), работы которой финансируются Программой ООН по окружающей среде и Всемирной Метеорологической Организацией, потенциал глобального потепления в течение нынешнего столетия составляет 1,4–5,8 °C [164]. В заявлении Исполнительного директора Программы ООН по окружающей среде Клауса Тепфера говорится: «Достигнутый учеными консенсус по антропогенной причине изменения климата, отраженный во всестороннем Докладе, должен звучать тревожным колоколом, как в столице каждого государства, так и в региональных центрах. Мы должны ... готовиться к повышающемуся уровню мирового океана, к изменению режима осадков и другим последствиям глобального потепления».

Реализуемая в настоящее время стратегия борьбы с селевыми явлениями в Казахстане разрабатывалась без учета возможного изменения климата, не было известно и о ключевой роли климата в селевой активности. Результаты исследований [90, 124, 132] свидетельствуют о настоящей необходимости разработки новой стратегии борьбы с селями, учитывающей увеличение селевой активности при повышении температуры воздуха на 2–3 °С. Селевая активность гляциально-го генезиса может возрасти за счет усиления ледникового стока, увеличения числа ледников (и, следовательно, числа моренно-ледниковых озер) вследствие распада ледниковых систем, усиления термокарстовых процессов на моренно-ледниковых комплексах, деградации криолитозоны. В настоящее время не существует методов количественного описания почти всех перечисленных выше процессов, оценки степени их влияния на селевую активность гляциального генезиса. Более оптимистична ситуация по оценке изменения селевой активности дождевого генезиса. Имеющиеся данные о современных ландшафтах северного склона Заилийского Алатау, соответствующих тем или иным высотным зонам, позволяют дать прогноз изменения ландшафтов по мере потепления климата и, тем самым, оценить изменение селеформирующих факторов [128].

Потепление климата на 2–3 °С 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 Заилийского Алатау вызовет увеличение числа рытвин в стартовой зоне, длины очагов селеобразования. Возрастет и площадь стокообразования, вследствие чего дожди с меньшей интенсивностью станут селеформирующими. Дегградация криолитозоны будет благоприятствовать вовлечению увлажненных рыхлообломочных пород в селеобразование. Все это приведет к увеличению повторяемости и масштаба селевых явлений.

Результаты анализа ливневых осадков, выпадающих в высокогорной зоне в условиях современного климата, свидетельствуют о том, что если бы эти осадки выпадали в жидком виде, мощные сели в каждом бассейне формировались почти ежегодно. Следовательно, можно ожидать увеличения повторяемости катастрофических селей.

Селевая активность значительно возрастет не только в высокогорной зоне хребта, но и в средне- и низкогорной зонах. Возраст верхней предгорной ступени, морфометрические характеристики ее рельефа, степень разрушения лессового покрова, существующего в настоящее время, позволяют сделать следующие выводы:

- Верхняя предгорная ступень образовалась в результате тектонических движений в основном в период рисского оледенения [53, 129]. В это же время на ней и предгорной равнине происходило накопление лесса.

Рельеф верхней предгорной ступени сформировался в рисс-вюрмское межледниковье.

- Наличие лессового покрова на большей части верхней предгорной ступени говорит о том, что климат голоцена не был благоприятным для развития эрозионных процессов в средне- и низкогорной зонах северного склона Заилийского Алатау. Поскольку климат голоцена на 2–3 °С холоднее климата рисс-вюрмского межледниковья [166], во время которого произошло разрушение не только лессового покрова, сформировавшегося в период рисского оледенения, но и образование рельефа верхней предгорной ступени, существует большая вероятность усиления эрозионных процессов при глобальном потеплении климата.
- Активизация эрозионных процессов в средне- и низкогорной зонах, при глобальном потеплении климата, произойдет вследствие трансформации ландшафтов Заилийского Алатау. В частности, ландшафт высокотравных лугов, характерный в настоящее время для верхней предгорной ступени, будет заменен ландшафтом полынно-злаковой полупустыни. Растительность этого ландшафта не сможет обеспечить защиту лессового покрова верхней предгорной ступени от активизации эрозионных процессов. Разрушение лессового покрова в свою очередь приведет к обнажению аллювиально-пролювиальных отложений, которые легко подвергаются эрозионным процессам и в условиях полупустыни мало пригодны для жизни растений. На месте увалисто-холмистого рельефа образуются бедленды, формирование которых уже в 20 веке началось в бассейне р. Каратурук, расположенном восточнее бассейна р. Тургень (рис. 68).

Практически неисчерпаемые запасы рыхлообломочных пород, тектоническое поднятие которых привело к образованию верхней предгорной ступени, создадут ситуацию, при которой даже ординарные осадки будут способны вызывать сели на обширных пространствах междуречий. Если меры по предотвращению эрозионных процессов не будут приняты, хозяйственная деятельность в междуречье станет невозможной.

По данным Института сейсмологии Республики Казахстан в ближайшее десятилетие северный склон Заилийского Алатау и прилегающие к нему территории подвергнутся сейсмическому воздействию, которое может вызвать многочисленные оползни. Эти оползни способны трансформироваться в селевые потоки, как это имело место во время Верненского землетрясения 1887 г.

Как показали исследования КазНИИЭК, в результате бессистемного и неконтролируемого хозяйственного освоения верхней предгорной ступени про-

изошло аномальное увлажнение значительных площадей лессового покрова до значений влажности, при которых возможен переход грунта в текучее состояние. Разжижение грунта, как показал опыт Гиссарского землетрясения 1989 г., может происходить даже при землетрясениях в 6–7 баллов. Массовые оползни способны привести не только к разрушению дачных строений, но и, при слиянии микроселей, к разрушениям в черте г. Алматы.



Рис. 68. Образование бедленда в бассейне р. Каратурук (хр. Заилийский Алатау) (фото А.Х. Хайдарова).

Полномасштабная оценка потенциальной селевой опасности сейсмического генезиса станет возможной только после изучения степени увлажненности лессового покрова, по крайней мере, на репрезентативных площадях северного склона Заилийского Алатау. Расчленение генезиса увлажнения на антропогенную и природную составляющие поможет разработать мероприятия, способные снизить ущерб от селей сейсмического генезиса.

Методы оценки селевой активности антропогенного генезиса ждут своих исследователей.

Глобальное потепление климата и связанная с ним активизация селевой деятельности могут привести к катастрофическим последствиям для хозяйственного механизма страны. Своевременная и надежная оценка последствий по-

тепления климата – стратегически важная задача, стоящая перед учеными Республики Казахстан.

5.2. Противоселевые защитные сооружения

Необходимость в проведении селезащитных мероприятий осознавалась уже при разработке генерального плана застройки укрепления Верного во второй половине 19 века [146]. Актуальность этой проблемы подтвердилась событиями 1921 г. [116], когда в результате селевого потока дождевого генезиса была разрушена восточная часть города и погибло около 500 человек.

Концепция защиты от селевых потоков г. Алматы и других населенных пунктов у подножия северного склона Заилийского Алатау создавалась и совершенствовалась более 70 лет. Первые довоенные проекты основывались на представлениях о селевых потоках как паводках, насыщенных смытым с эродированных водосборных площадей грунтом (экспедиция Всесоюзного агролесомелиоративного института, 1932–1934 гг.); затем как паводков, с расходами сотни кубометров в секунду, размывающих русловые отложения и насыщающихся ими до плотности 1400–1600 кг/м³ (экспедиция Академии коммунального хозяйства РСФСР под руководством Н.С. Дюрнбаума, 1937–1940 гг.). Соответственно этим представлениям изменялись и способы защиты: лесомелиорация, террасирование склонов, укладка в руслах огромного количества каменных завалов высотой до 5 м, устройство котлованов-селеуловителей, осветленная вода из которых должна была сбрасываться по канализированному руслу р. Весновка с расходами до 800 м³/с [147] !

В 1949–1951 гг. Казгосстройпроект разработал проект селезащиты г. Алматы, предусматривавший устройство двух котлованов-селеуловителей на конусе выноса и водосбросного тракта на р. Весновка. Проект не был утвержден ввиду высокой стоимости работ. В 50-х годах Гипроводхоз Минсельхоза СССР предложил соорудить завальную плотину взрывным способом в урочище Медеу (бассейн р. Малая Алматинка), вододелитель на р. Весновка, облицовку ее русла. В соответствии с проектом Гипроводхоза в 1960–1963 гг. построен Весновский вододелитель, облицовано бетонными плитами русло р. Весновка (в пределах города). В 1964 г. Казгидропроект доработал проект плотины Гипроводхоза. В период 1964–1966 гг. в бассейне р. Малая Алматинка построены 4 сквозных металлических селеуловителя и габионная плотина в урочище Мынжилки, а также сифонный водосброс, позволяющий понижать уровень воды моренного озера [111]. К настоящему времени из этих сооружений уцелели только 2 сквозных металлических селеуловителя, расположенных ниже урочища Медеу, остальные уничтожены селом 1973 г. Все перечисленные проекты были разработаны под «гидрологическую» концепцию селеобразования. Согласно этой концепции, за-

держав селевой поток, селехранилище потеряет лишь 30 % своей аккумулирующей емкости, остальная часть селя, в виде жидкого стока, сбрасывается в нижний бьеф с безопасными расходами в течение нескольких дней после селя.

Опыт эксплуатации экспериментальной сквозной селезащитной плотины в бассейне р. Акжар (хр. Заилийский Алатау) показал, что основное назначение таких сооружений (задержание крупных фракций твердой составляющей селевой массы и пропуск смеси воды с мелкими фракциями) на практике не реализуется. Сквозное сооружение очень быстро превращается в глухую плотину. Причиной этого становится уменьшение сквозности плотины в ходе задержания частиц.

Направленными взрывами в 1966–1967 гг. в урочище Медеу была создана основа уникальной каменно-набросной плотины. К 1972 г. емкость селехранилища, путем механизированной досыпки тела плотины, была доведена до 6,2 млн. м³ [147]. Селехранилище в Медеу должно было обеспечить задержание селевого паводка обеспеченностью 0,01 % [111]. Предполагалось, что «... плотина-селеуловитель в урочище Медеу будет служить 10 000 лет» [4].

В 1972 г. на Чемолганском селевом полигоне КазНИГМИ под руководством Ю.Б. Виноградова впервые в мировой практике были проведены эксперименты по воспроизведению искусственных селевых потоков в естественных условиях. Первые же эксперименты показали несостоятельность «гидрологической» концепции. Попуски воды из водохранилища с расходом 26 м³/с вызвали селя с расходом 430 м³/с, а плотность селевой массы составила 2400 кг/м³, причем свободной воды в селевой массе практически не было [14, 118]. Стало ясно, что в Заилийском Алатау господствуют не наносоводные, а грязекаменные сели высокой плотности, что подтвердилось в 1973 г., когда гигантский селя гляциального генезиса с объемом 3,8 млн. м³ был задержан вовремя сооруженной плотиной в урочище Медеу [24]. Изучение Гидропроектом селевых отложений 1921 г., следов Иссыкского селя 1963 г., изменение представлений о природе селей в результате исследований КазНИГМИ послужило основанием для пересмотра подходов к проектированию противоселевых защитных сооружений.

Опыт эксплуатации селезащитных сооружений, накопленный к 1974 г., убедил проектировщиков, что противостоять мощному грязекаменному селевому потоку дождевого или гляциального генезисов могут только мощные конструкции. Главным направлением стратегии селезащиты стало задержание селей с помощью массивных плотин в горных долинах. Большой вклад в конструирование селезащитных сооружений, предназначенных для защиты автомобильных дорог, разработку методов их расчета и оценки надежности внес Ж.Б. Байнатов [2, 3]. Сведения о построенных до 1990 г. основных селезащитных сооружениях приведены в таблице [14, 100]. Кроме перечисленных в таблице сооружений выполнены следующие работы:

- проведено берегоукрепление р. Иссык на протяжении более 2 км;
- проведена стабилизация русел рек Аксай, Каскелен, Большая Алматинка, Малая Алматинка, Кимасар, Весновка с устройством каскада наносоуловителей и построен наносоотстойник на р. Большая Алматинка;
- произведено наращивание плотины Большого Алматинского озера и облицовка ее со стороны верхнего бьефа бетонными плитами.

Нормативные документы, регламентирующие проектирование и строительство противоселевых защитных сооружений, а также рекомендуемые методы расчета характеристик дождевых селей были разработаны 20–25 лет назад. В то время опыт противоселевых мероприятий был незначительным. Несовершенство этих документов является причиной разрушения противоселевых защитных сооружений, а также создает предпосылки для аварий и катастроф.

Незавершенность строительства водоотводных сооружений на плотине в Медеу к моменту прохождения селя 1973 г. стала причиной аварийного состояния плотины. Потребовались огромные средства и усилия тысяч людей для предотвращения прорыва селехранилища, последствия которого для г. Алматы были бы катастрофическими. Прорыв отстойника сточных вод г. Алматы в пустыне Жаманкум в 1988 г. унес жизни нескольких человек, нанес большой ущерб народному хозяйству [146].

В долинах рек Иссык и Каскелен селезащитные конструкции представляют собой сквозные железобетонные сооружения. Как показал опыт, сквозные железобетонные сооружения не способны противостоять селям, содержащим в своем составе валунно-глыбовые фракции. Плотина на р. Герхожансу, призванная защитить г. Тырнауз (Северный Кавказ), была разрушена (рис. 69). «В 1999 г. первые же удары крупных валунов, как тараны, 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» [112].

Иногда селезащитные сооружения разрушаются от рядовых паводков. Примером может служить быстроток на р. Весновка выше проспекта Аль-Фараби (рис. 70). Инженерное сооружение разрушилось в результате того, что при проектировании не была учтена суффозия, вызванная негерметичностью основного канала. Канализованный участок р. Весновка, разрушенный водным паводком, представлен на рисунке 71. Причиной разрушения явилось эрозийное углубление канала, поскольку проектом не предусматривалось бетонирование его дна или снижение скорости потока путем создания повышенной шероховатости на облицовке канала.

Таблица
Основные селезащитные сооружения, построенные до 1990 г.

Бассейн	Тип сооружения	Высота, м	Длина по гребню, м	Ширина по гребню, м	Ширина по основанию, м	Емкость селехранилища, млн. м ³	Абс. высота, м	Примечание
Узункарталы	Насыпная плотина	34,0	170,0	6,0	172,0	0,75	1360	
Каскелен	Сквозная железобетонная плотина	19,8	88,0	7,8	48,0	2,2	1100	
Акса́й (Акжа́р)	Сквозная железобетонная плотина	7,2	21,0			0,035	1460	Полностью занесена
Большая Алматинка	Ячеистая железобетонная плотина	40,0	400,0		>200,0	14,5	1240	
Большая Алматинка (Кокче́ка)	Арочная плотина из сборных железобетонных блоков	6,0	21,8	1,8	2,0		1340	Полностью занесена
Малая Алматинка (Мынжилки)	Насыпная плотина	17,0				0,23	3000	
Малая Алматинка (Медеу)	Каменно-набросная плотина	150,0	530,0		800,0	12,6	1750	
Малая Алматинка (ниже Медеу)	Два сквозных металлических сооружения						1250	
Талга́р	Насыпная плотина					8,5	1120	Не завершена
Иссы́к	Насыпная плотина	53,0				>12,0	1700	
Иссы́к (выше озера)	Сквозная железобетонная плотина	18,0	118,0		33,0	1,5	1900	

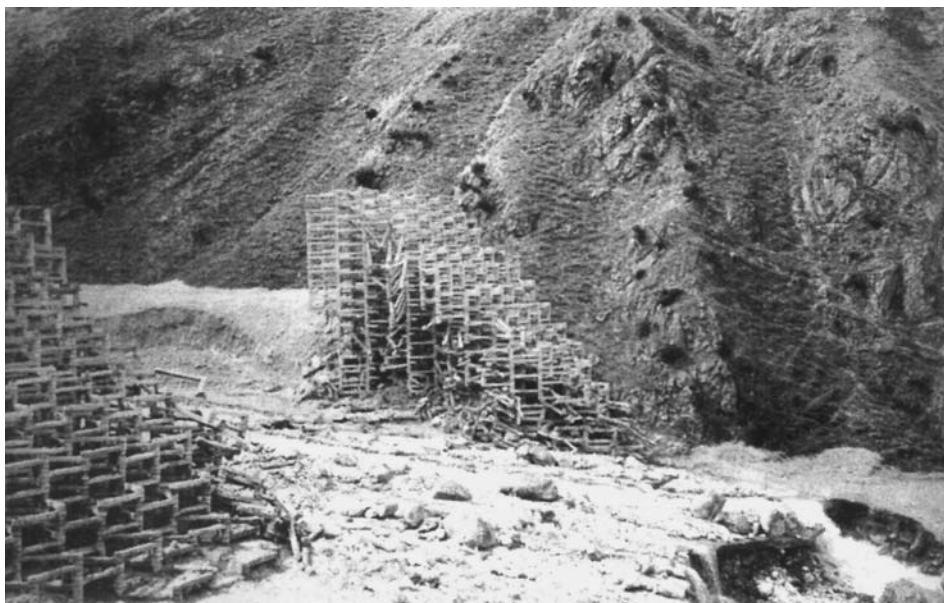


Рис. 69. Плотина на р. Герхожанасу, разрушенная селевым потоком 20 августа 1999 г. [112].



Рис. 70. Быстроток на р. Весновка выше проспекта Аль-Фараби (фото Б.С. Степанова).



Рис. 71. Разрушение облицовки стабилизированного русла р. Весновка из-за эрозионного углубления дна (фото А.Х. Хайдарова).

5.3. Превентивные противоселевые мероприятия

Опыт борьбы с селями на северном склоне Заилийского Алатау показал, что при рациональном использовании научного потенциала Республики Казахстан затраты на селезащитные мероприятия могут быть значительно снижены. Уменьшение ущерба, наносимого селями, может быть осуществлено различными способами. Наиболее эффективным способом борьбы с селями гляциального генезиса является предотвращение возникновения и развития озер на моренно-ледниковых комплексах, их превентивное опорожнение. При благоприятном геоморфологическом строении горных долин могут быть созданы емкости, которые способны аккумулировать паводковые воды, тем самым предотвращая сели. Положительный результат достигается не только тем, что водные потоки не трансформируются в селевые, но и исключается вовлечение грунтовых вод в процесс селеформирования в ходе эрозионных процессов, вызванных прохождением селей. На рисунке 72 приведены данные о стоимости задержания 1 м³ условной селевой смеси при различных способах борьбы с селями.

До настоящего времени превентивные мероприятия по снижению ущерба от селей в Казахстане ограничиваются опорожнением моренных озер. Экономическая и экологическая эффективность проведения таких работ 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 [79].

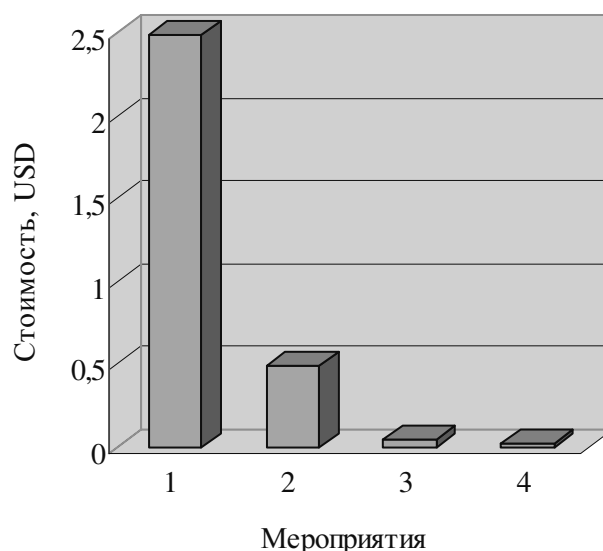


Рис. 72. Стоимость задержания 1 м³ условной селевой смеси.
1 – селехранилища; 2 – аккумуляция воды; 3 – превентивное опорожнение; 4 – предотвращение зарождения озер.

Наибольшее распространение в практике работы Казселезащиты получил метод постепенного углубления открытого эвакуационного канала в озерной перемычке (ручная разборка с применением взрывов и промывание канала озерными водами, специально накапливаемыми с помощью временных плотин). Есть примеры удачного опорожнения моренных озер – озеро Богатырь, где взрывом на озерной перемычке был сформирован открытый канал, обеспечивающий сброс бытовых расходов на начальном этапе опорожнения; озеро, располагавшееся на морене ледника Жарсай (правый) и др. [4, 77]. В иных случаях усилия по опорожнению озер не приводили к желаемым результатам [89, 123].

Другой метод борьбы с селями гляциального генезиса реализован в результате строительства плотины в урочище Мынжилки, призванной служить емко-

стью для регулирования прорывных ледниковых паводков. Надо заметить, что эта емкость выполнит свое назначение только в том случае, если в нее поступит вода, а не селевая масса.

В результате исследований, выполненных в КазНИИЭК в последние годы, установлено, что причиной зарождения селей дождевого генезиса на северном склоне Заилийского 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 [122].

Реализуемая в последние десятилетия концепция защиты от селей разрабатывалась в отсутствии научно обоснованных представлений о селевой активности бассейнов рек северного склона Заилийского Алатау. Наиболее достоверная информация о селевой активности имела только по бассейну р. Малая Алматинка. Оценка реальной селевой опасности стала возможной лишь в результате исследований, выполненных в 1993–1998 гг. [125, 131, 161, 162, 163], и разработки основ управления селевыми процессами горных систем Казахстана [73, 74]. Это позволило дать объективную оценку правильности проектных решений по защите населенных пунктов и объектов хозяйственной деятельности в основных бассейнах рек северного склона Заилийского Алатау. Результаты расчета необходимой емкости селезадерживающих сооружений и паспортные данные плотин, возведенных к настоящему времени, приведены на рисунке 73. Основой расчета послужила проверенная временем селевая активность бассейна р. Малая Алматинка, где в течение 20 столетия сформировалось 2 села суммарным объемом около 8 млн. м³, и данные об объеме селя, который может сформироваться при прорыве озера № 6 на леднике Маншук Маметовой (более 10 млн. м³ [4]), а также сведения о селевой активности других бассейнов, оцененные по объемам конусов выноса, замыкающих эти бассейны.

Нетрудно видеть, что емкость плотины в бассейне р. Узункаргалы почти в 32 раза меньше необходимой, в бассейне р. Каскелен – в 6,5 раза, в бассейне р. Большая Алматинка – в 2,5 раза, в бассейне р. Талгар – в 6 раз, в бассейне р. Иссык – в 7,5 раза. Ситуация, при которой емкости селезащитных сооружений существенно меньше необходимых, представляет большую опасность, так как переполнение селехранилищ и перелив селевой массы через гребень плотин чреваты разрушением селехранилищ и формированием вторичных селей по масштабам не уступающим природным.

Наличие угрозы жизненным интересам более чем 13 % населения Республики Казахстан, обусловленной активизацией селей, результаты научных исследо-

ваний, выполненных в последние годы, а также накопленный опыт противоселевых мероприятий приводят к выводу о необходимости пересмотра стратегии борьбы с селями. Основным направлением современной концепции защиты от селей является строительство селезадерживающих сооружений. Второстепенная роль отводится задержанию паводковых вод в высокогорной зоне (плотина в урочище Мынжилки), а также превентивному опорожнению селеопасных озер. Затраты, направленные на проведение превентивных мероприятий, составляют менее 5 % от средств, выделяемых на строительство крупных селезащитных комплексов [4]. Предлагаемая концепция стратегии борьбы с селями требует коренного пересмотра соотношения затрат на противоселевые мероприятия [90, 124].

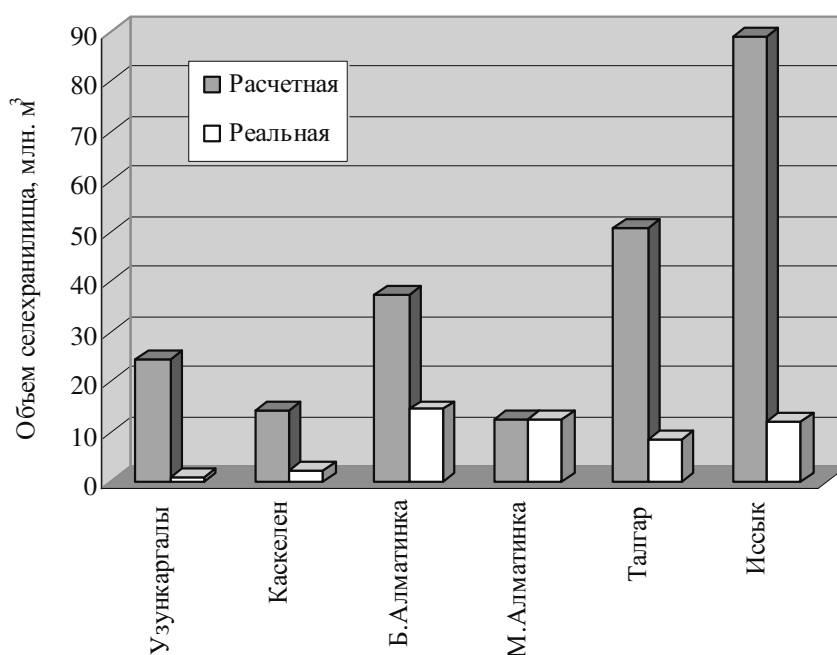


Рис. 73. Рассчитанные и реально существующие емкости селезащитных сооружений.

Генеральным направлением деятельности организаций, занимающихся обеспечением защиты от селей населения и объектов хозяйственной деятельности, должны, по нашему мнению, стать превентивные мероприятия [133].

Главными из них следует считать:

- предотвращение зарождения емкостей на моренно-ледниковых комплексах;

- принятие мер по стабилизации существующих потенциально опасных котловин и водоемов на моренно-ледниковых комплексах;
- превентивное опорожнение водоемов моренно-ледниковых комплексов;
- мелиоративные работы в очагах селеформирования дождевого генезиса;
- предотвращение опустынивания средне- и низкогорной зон в результате разрушения лессового покрова;
- предотвращение оползней, вызываемых аномальным увлажнением лессового покрова в результате хозяйственной деятельности;
- задержание в высокогорной зоне паводковых вод, обусловленных прорывом водоемов моренно-ледниковых комплексов;
- мероприятия по повышению устойчивости лессового покрова средне- и низкогорной зон к сейсмическим воздействиям, способным генерировать сели;
- поддержание эксплуатационной надежности существующих селезащитных сооружений. Их следует рассматривать в качестве резерва, призванного подстраховывать мероприятия по предотвращению селей дождевого, гляциального и других генезисов.

Изменение концепции борьбы с селями позволит:

- предотвратит эрозионные процессы в высокогорной зоне и сохранить альпийские луга (пастбища, зоны рекреации и экологического туризма);
- сохранить биоразнообразие;
- предотвратит или резко сократит масштабы селевой деятельности;
- предотвратит эрозионные процессы в средне- и низкогорной зонах;
- создать условия для устойчивого развития в горной и предгорной зонах (в том числе и на территориях, занимаемых такими городами как Алматы, Каскелен и др.);
- значительно сократить затраты на противоселевые мероприятия (см. рис. 72).

Потепление климата на 2–3 °С, при непринятии мер по снижению селевой активности, приведет к активизации эрозионных процессов и, как следствие, опустыниванию не только высокогорной зоны, но и низкогорья, и предгорной равнины. Появится значительная угроза биоразнообразию в горной и предгорной зонах, хозяйственной деятельности в наиболее густо населенных районах юга и юго-востока Казахстана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия 20 века достигнуты большие успехи в понимании природы селей. Важную роль в этом сыграли эксперименты по воспроизведению искусственных селей, осуществлявшиеся сотрудниками Казахского научно-исследовательского гидрометеорологического института в период 1972–1978 гг. Впервые было доказано, что при определенных условиях в результате взаимодействия водного потока с рыхлообломочными породами образуется селевая масса с плотностью 2400 ± 20 кг/м³, а следовательно, вязкостью и пластичностью, которые необходимо учитывать при расчете характеристик потока. Именно эти характеристики определяют тенденцию трансформации расхода, объема и плотности селевой массы по мере движения селевого потока. В свою очередь они определяют дальность продвижения селя, уравнительную поверхность заполнившегося селехранилища и, следовательно, его реальную емкость. Погрешность, с которой могут быть рассчитаны или экспериментально определены эти и некоторые другие характеристики, приемлема для проектирования селезащитных сооружений и проведения противоселевых мероприятий.

Получение характеристик водной составляющей селей, в значительной степени определяющей повторяемость селевых явлений как дождевого, так и гляциального генезисов, является наиболее слабым звеном. Высокая степень неопределенности данных о водной составляющей селей – основная причина низкой оправдываемости прогноза селевых явлений. Качество прогноза селей дождевого генезиса зависит от успехов в предсказании слоя и интенсивности осадков. В ближайшие десятилетия вероятность значительного прогресса в данной области метеорологии мала. Сели дождевого генезиса в высокогорной зоне, как правило, начинают развиваться лишь через несколько десятков минут после начала выпадения селеформирующих осадков. Это позволяет надеяться, что расширение сети автоматических метеорологических станций сделает возможным сверхкраткосрочное прогнозирование селей, способное предотвратить гибель людей. Большая стоимость оценки прорывоопасности водоемов моренно-ледниковых комплексов, соизмеримая с затратами на их превентивное опорожнение, приводит к тому, что прогнозирование селей гляциального генезиса становится нерентабельным и вряд ли имеет перспективы.

Большой научный и практический интерес будут представлять исследования, связанные с оценкой изменения селевой активности в условиях изменяющегося климата, а также разработка методов активного воздействия на ход селевых процессов, что позволит оптимизировать вложение средств на проведение противоселевых мероприятий.

ГЛОССАРИЙ

Внутриледниковая емкость – полость, образованная в результате термокарстовых процессов или разрывных деформаций в теле ледника.

Англ.: Intraglacial hollow

Вюрмское оледенение (вюрм от названия р. Вюрм в Баварии, Германия) соответствует *вистлинской ледниковой эпохе* Северной Европы, *валдайской* – Восточно-Европейской равнины, *висконсинской* – Северной Америки (117–13 тыс. лет назад [52]).

Англ.: Würm Ice Age

Голоцен (от греч. holos – весь и kainos – новый) – послеледниковая эпоха. Начало Голоцена условно совпадает с окончанием последнего материкового оледенения на Севере Европы (10–13 ? тыс. лет назад).

Англ.: Holocene

Грязевой селя – разновидность грязекаменного селя, в котором размер крупных обломков не превышает 20 мм [105].

Англ.: Mudflow

Грязекаменный селя – поток, состоящий из воды, глинистых частиц и обломков горных пород, размер которых может превышать 1 м. Как правило, селевая масса таких селей обладает вязкопластическими свойствами и имеет плотность 2300–2400 кг/м³.

Англ.: Debris flow

Критический расход – минимальный расход воды, способный вызвать формирование селя [105].

Англ.: Critical discharge

Критический уклон – минимальный уклон поверхности залегания селеформирующих пород, при котором становится возможна реализация того или иного процесса селеформирования [105].

Англ.: Critical slope

Морена – термин широкого употребления, означающий: 1) массы обломков горных пород, переносимые ледниками на своей поверхности и внутри толщи льда, – поверхностная, внутренняя и придонная морена; 2) морфологические элементы ледников, представляющие собой гряды мореносодержащего льда, покрытые чехлом обломочного материала, – боковые, срединные и фронтальные морены; 3) ледниковые отложения – обломочный материал, перенесенный и отложенный ледниками в виде основной (донной), абляционной и конечной морены; 4) форма рельефа – холмы и гряды, образованные в результате аккумуляции ледниковых отложений, а также гляциодислокаций напора и выдавливания – нагнетания, захвативших породы и отложения как ледникового, так и неледникового генезиса, – холмистые, грядовые, краевые, напорные морены [32].

Англ.: Moraine

Моренное озеро – озеро, ванной которого служит замкнутое понижение рельефа в области ледниковой аккумуляции. Такие ванны образуются при неравномерном таянии погребенных мертвых льдов, обособляются между холмами и грядами отложенной морены. Вытаивание ледяных ядер из молодых моренных гряд, подпруживающих моренное озеро, может быть причиной внезапных прорывов озер и возникновения гляциальных селей [32].

Англ.: Morainic lake

Наносоводный сель – поток, переносящий большое количество наносов за счет транспортирующей способности воды [105].

Англ.: Sediment-water flow

Очаг рассредоточенного селеобразования – участок крутых ($35\text{--}55^\circ$) обнажений сильно разрушенных горных пород, имеющих густую сеть борозд, в которых накапливаются продукты выветривания горных пород. В процессе выпадения ливней происходит формирование микроселей, объединяющихся затем в едином селевом русле [105].

Паводок – быстрый, сравнительно кратковременный подъем уровня воды в реке, возникающий в результате обильных дождей, интенсивного таяния снега и льда, реже – в результате прорыва грунтовых и ледяных плотин; паводки носят нерегулярный характер. Значительное возрастание скорости и расхода водного потока во время паводка сопровождается увеличением мутности воды, переформированием русла, а при благоприятных условиях приводит к зарождению селя путем срыва отмостки и глубинной эрозии русла [94].

Англ.: Flood

Постселевой паводок – паводок, обычно проходящий непосредственно вслед за грязевым или грязекаменным селем, активно размывающий и резко меняющий характер свежих селевых отложений [105].

Англ.: Post debris-flow flood

Превентивные мероприятия – мероприятия, направленные на предотвращение селя или уменьшение его характеристик.

Англ.: Preventive measures

Противоселевые сооружения – одна из категорий (техническая) в системе мер защиты от селей. Назначение противоселевых сооружений – прямое воздействие на движущийся селевой поток в целях ограничения зоны его вредного воздействия или остановки. В руслах селевых и неселевых горных водотоков строят простейшие сооружения для предотвращения глубинного и бокового размыва русла – берегоукрепительные стенки, отмостки, донные запруды. Собственно противоселевые сооружения по основному назначению подразделяются на три класса – регулирующие, задерживающие, стабилизирующие. *Регулирующие сооружения* – дамбы, селеспуски, селепропускные каналы и др. – служат для отвода, изменения направления движения, локализации или пропуска потока над или под защищаемым объектом. *Задерживающие сооружения* – селезадерживающие плотины и селехранилища – рассчитаны на остановку всей селевой массы или большей части твердой составляющей потока. *Стабилизирующие сооружения* – система невысоких подпорных запруд вдоль селевого русла – преобразуют его продольный профиль в ступенчатый, с меньшими уклонами, что препятствует формированию селей. Противоселевые сооружения наиболее эффективны в сочетании с мелиорацией селевых бассейнов [94].

Англ.: Debris-flow protection structures

Распад селевой смеси – перемещение частиц, находящихся в селевом потоке, в направлении силы тяжести [105].

Англ.: Decay of debris-flow mixture

Рисс-вюрмское межледниковье – межледниковая эпоха, разделяющая рисскую и вюрмскую ледниковые эпохи в Альпах. Соответствует *эмскому межледниковью* Средней Европы, *микулинскому* – Восточно-Европейской равнины, *сангамонскому* – Северной Америки (127–117 тыс. лет назад [52]).

Англ.: Riss-Würm Interglacial period

Рисское оледенение (Рис – название одного из притоков Дуная) соответствует *заальской ледниковой эпохе* Северной Европы, *днепровской и московской* – Восточно-Европейской равнины, *иллинойской* – Северной Америки (350–130 тыс. лет назад [52]).

Англ.: Riss Ice Age

Рыхлообломочная порода – обломочная порода, образовавшаяся в результате физического и химического выветривания исходных горных пород, оставшихся на месте или отложившихся в результате последующего переноса.

Англ.: Loose rock debris

Селевая опасность – угроза здоровью и жизни людей, а также потери материальных ценностей, обусловленная селом.

Англ.: Debris-flow hazard

Селевая рытвина – отрицательная форма рельефа, выработанная в склоновых отложениях; глубина рытвин редко превышает 10 м, уклон колеблется в пределах 15–35°.

Селевая смесь (селевая масса) – смесь глинистых частиц, обломков горных пород и воды, образующая селевой поток. Состав селевой массы зависит от генезиса селя и геологического строения селевого бассейна. В районах современного оледенения и горах субарктики в качестве твердой составляющей выступают также снег и лед; в залесенных районах в составе селевой массы заметное участие принимают обломки древесной растительности.

Англ.: Debris-flow mixture (debris-flow mass)

Селевая суспензия – смесь воды, глинистых частиц и обломков горных пород размером менее 1 мм [105].

Англ.: Mudflow suspension

Селевое поле выноса – форма рельефа, образованная селевыми отложениями на расширенном участке речной долины [105].

Англ.: Debris flow deposition area

Селевое русло – русло постоянного или временного горного водотока, морфологическое строение которого определяется прохождением селей.

Англ.: Debris-flow channel

Селевой врез – отрицательная форма рельефа, выработанная обычно в толще древних моренных отложений и чаще всего приуроченная к резким перегибам поверхности; селевые врезы могут также формироваться на вулканогенных, оползневых и обвальных фациях. Глубина селевого вреза может достигать 100 м и более, уклон дна составляет 10–25° и более [105].

Англ.: Debris-flow gully

Селевой очаг (очаг селеобразования) – участок речного бассейна (преимущественно горного), характеризующийся наличием рыхлообломочных пород, обладающих достаточной потенциальной энергией для того, чтобы при воздействии на них водного импульса или нарушения устойчивости водонасыщенных грунтов произошла быстрая реализация энергии с формированием селевого потока. Селевые очаги подразделяются на врезы, рытвины и очаги рассредоточенного селеобразования [105].

Англ.: Debris flow origination site

Селевой процесс – совокупность природных процессов, составляющих этапы подготовки, зарождения и трансформации характеристик селевого потока во время его движения, а также остановки или частичного распада.

Англ.: Debris-flow process

Селевые отложения – скопления обломков горных пород вдоль селевых русел, на полях и конусах выноса, образующиеся в результате распада или остановки селевой смеси [105].

Англ.: Debris-flow deposits

Селевое явление – форма реализации селевого процесса в условиях определенной географической обстановки, естественной или измененной человеком. Селевое явление включает в себя и селевой процесс, и его результат – рельефообразование [94].

Англ.: Debris-flow phenomenon

Селезадерживающая плотина – один из типов противоселевых сооружений, рассчитанных на остановку селя, аккумуляцию его твердой составляющей и организованный сброс жидкой составляющей селя и бытового стока реки. Конструкции селезадерживающих плотин могут быть массивными – из бетона, железобетона, каменной кладки, грунтовых материалов – или сквозными (решетчатыми), собранными из железобетонных или стальных деталей. Высота селезадерживающих плотин в зависимости от объема селевых выносов варьирует от

10–15 до 100–150 м. Она рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить полную аккумуляцию выносов обломочного материала селевым потоком расчетной обеспеченности. Селезадерживающая плотина возводится как в качестве единственного или основного средства защиты, так и в сочетании с другими видами сооружений и мелиорацией [94].

Англ.: Debris-flow check dam

Селеопасное озеро – озеро, прорыв которого может привести к формированию селя.

Англ.: Debris-flow hazardous lake

Селеформирующие грунты – массивы почвогрунтов, рыхлообломочных отложений, принимающие участие в селевом процессе [105].

Англ.: Debris-flow forming rock

Селехранилище – участок долины в селевом бассейне у верхнего бьефа селезадерживающей плотины, на котором концентрируется обломочный материал селевых выносов. Для сохранения емкости селехранилища требуется его периодическая очистка; для увеличения этой емкости на месте селехранилища иногда роют котлован. В некоторых засушливых районах селехранилища используют и в качестве водохранилищ, совмещая их функции [94].

Англ.: Debris-flow reservoir

Хвостохранилище (хранилище хвостов). Хвосты – отходы обогащения полезных ископаемых [8].

Англ.: Tailing pit

ЛИТЕРАТУРА

1. Байдал М.Х. Некоторые особенности распределения летних осадков в горах Заилийского Алатау // Труды КазНИГМИ. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – Вып. 29. – С. 49–54.
2. Байнатов Ж.Б. Защитные сооружения горных автомобильных дорог от селевых потоков: Автореф. дис. ... доктора техн. наук. – Москва, 1993. – 47 с.
3. Байнатов Ж.Б. Конструкции селезащитных сооружений и методы их расчета. – Алма-Ата: КазНИИТИ, 1991. – 159 с.
4. Безопасность и контроль гляциальных селей в Казахстане. – Алматы: Фылым, 1998. – 102 с.
5. Белогривцева Р.И. Определение возраста селевых отложений в бассейне р. Чемолган дендрохронологическим методом // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1976. – № 1. – С. 53–59.
6. Благовещенский В.П. Водоснежные потоки в Хибинах. – В кн.: Исследование снега и лавин в Хибинах. – Л., 1975. – С. 88–96.
7. Боголюбова И.В. Селевые потоки и их распространение на территории СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – 152 с.
8. Большая советская энциклопедия. – М.: Большая советская энциклопедия, 1955. – Т. 38. – 668 с.
9. Боровинский Б.А. Электроразведочные работы на морене Малоалматинских ледников // Гляциологические исследования в период МГГ: Заилийский и Джунгарский Алатау. – Алма-Ата: АН КазССР, 1961. – Вып. 1. – С. 113–135.
10. Бударина О.И., Перов В.Ф., Сидорова Т.Л., Белая Н.Л. Генезис и режим селевых явлений Южной Америки // Материалы гляциологических исследований. – М., 2000. – Вып. 88. – С. 50–55.
11. Вардугин В.Н. Гранулометрический состав рыхлообломочных пород в селевых очагах и на конусах выноса // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1977. – № 2. – С. 94–106.
12. Вардугин В.Н. Основные физико-механические свойства селеформирующих грунтов и селевых отложений в бассейне р. Чемолган // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1976. – № 1. – С. 25–35.

13. Вардугин В.Н. Состав и свойства рыхлообломочных пород и их роль в формировании селевых потоков: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Ташкент, 1983. – 23 с.
14. Вардугин В.Н., Малахов В.Д. Эффективные методы защиты селевых бассейнов Казахстана. – Алма-Ата: КазНИИНТИ, 1988. – 67 с.
15. Великанов М.А. Гидрология суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1948. – 530 с.
16. Великанов М.А. Современные представления о динамической структуре селевого потока. – В кн.: Вопросы геологии Азии. – М.-Л.: АН СССР, 1955. – Т 2. – С. 397–403.
17. Величайшие катастрофы мира. Энциклопедический справочник / Автор-сост. Н.Н. Непомнящий. – М.: Вече, 2006. – 496 с.
18. Вениери Р.Ю. Сели на Приполярном и Полярном Урале // Исследование ледников и ледниковых районов. – М., 1963. – Вып. 3. – С. 152–158.
19. Вержбицкий А.Ф. О причинах Верненской катастрофы 8-го июля 1921 г. // Иригация, сельское хозяйство и животноводство. – 1921. – № 2. – С. 14–19.
20. Вилесов Е.Н. Эволюция внутриконтинентальной ледниковой системы в XX веке (на примере северного склона Заилийского Алатау): Автореф. дис. ... доктора геогр. наук. – Алматы, 1997. – 47 с.
21. Винниченко С.М., Лим В.В., Огнев Н.С. Вопросы рационального использования сейсмоактивных горноскладчатых территорий. Обзорная информация. – Душанбе, 1989. – 48 с.
22. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 154 с.
23. Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 144 с.
24. Виноградов Ю.Б., Земс А.Э., Хонин Р.В. Селевой поток 15 июля 1973 г. на Малой Алматинке // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1976. – № 1. – С. 60–73.
25. Виноходов В.Н. Стихийные бедствия и мероприятия по уменьшению опасности природных катастроф в Казахстане / Современные проблемы геоэкологии и созологии. – Алматы, 2001. – С. 194–196.
26. Гавришина Л.Н. К методике анализа количественных характеристик селеформирующих грунтов // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1989. – № 11. – С. 79–81.
27. Гавришина Л.Н. Методика определения статического напряжения сдвига вязкопластичных селевых смесей // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1985. – № 9. – С. 105–113.
28. Гавришина Л.Н. О природе пластичности селевой смеси и пределах ее существования // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – № 8. – С. 42–52.

29. Гавришина Л.Н., Степанов Б.С. К методике определения вязкости селевой смеси // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – № 8. – С. 124–130.
30. Гагошидзе М.С. Селевые явления и борьба с ними. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1970. – 386 с.
31. Герасимов В.А. О следах древнего оледенения в Заилийском Алатау // Гляциологические исследования в период МГГ: Заилийский и Джунгарский Алатау. – Алма-Ата: АН КазССР, 1961. – Вып. 1. – С. 150–169.
32. Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 528 с.
33. Голубов Р.С. Метеорологические условия формирования селевого потока 15 июля 1973 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1976. – № 1. – С. 73–74.
34. Голубов Р.С. Синоптико-климатическое описание обильных ливней в районе Алма-Аты // Труды КазНИГМИ. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – Вып. 10. – С. 104–118.
35. Голубов Р.С., Рындина В.Р. Некоторые возможности в определении селеопасности в бассейнах рек северного склона Заилийского Алатау // Труды КазНИГМИ. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – Вып. 29. – С. 42–48.
36. Голубцов В.В. О распределении вероятностей выпадения максимальных осадков по высотным зонам при различном положении нулевой изотермы // Труды САРНИГМИ. – Доклады Всесоюзного симпозиума «Математические методы в теории и практике расчетов и прогнозов стока горных рек». – 20–24 октября 1970 г., г. Ташкент. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – Вып. 1 (82). – С. 70–76.
37. Горбунов А.П. Пояс вечной мерзлоты Тянь-Шаня: Автореф. дис. ... доктора геогр. наук. – М., 1974. – 33 с.
38. Горбунов А.П., Северский Э.В. Геокриологическая высотная поясность северного Тянь-Шаня. – В кн.: Криогенные явления Казахстана и Средней Азии. – Якутск, 1979. – С. 67–83.
39. Горбунов А.П., Северский Э.В. Сели окрестностей Алматы: взгляд в прошлое. – Алматы, 2001. – 80 с.
40. Городецкий В.Д. Алма-Атинская катастрофа 8–9 июля 1921 года. – Кызыл-Орда, 1930. – 10 с.
41. Городецкий В.Д. Причины Алма-Атинской катастрофы 8 июля 1921 г. // Вестник Центрального музея Казахстана. – Алма-Ата, 1936. – № 1. – С. 23–40.
42. Грунтоведение / Под ред. Е.М. Сергеева. – М.: МГУ, 1973. – 386 с.
43. Деговец А.С. О масштабах селей и стратегии противоселевой защиты в Казахстане // Вестник АН КазССР. – Алма-Ата, 1989. – № 1. – С. 40–44.

44. Дуйсенов Е. Селевые потоки в Заилийском Алатау. – Алма-Ата: Казахстан, 1971. – 192 с.
45. Дуйсенов Е.Д. О профилактических мероприятиях по борьбе с селями в районе ледника Туюксу // Труды КазНИГМИ. – М.: Гидрометеиздат, 1969. – Вып. 33. – С. 83–87.
46. Епанечников В.В. Научная экспедиция о наводнении // Правда (Алма-Ата). – 1921. – 27–29 июля. – № 62–63. – С. 2.
47. Есеркепова Т.А. Синоптические процессы, предшествовавшие селевым паводкам ливневого происхождения в бассейнах Большой и Малой Алматинки // Труды КазНИГМИ. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – Вып. 29. – С. 26–35.
48. Жандаев М.Ж. Вопросы геоморфологии и неотектоники Заилийского Алатау // Ученые записки КазГУ. Серия геол. и геогр. – Алма-Ата, 1958. – Вып. 4. – С. 10–14.
49. Жандаев М.Ж. Природа Заилийского Алатау. – Алма-Ата: Казахстан, 1978. – 159 с.
50. Женжурист Э.М. Алма-Атинская катастрофа 8 июля 1921 г. // Вестник ирригации. – Ташкент, 1923. – № 1. – С. 27–31.
51. Земс А.Э. Некоторые количественные характеристики Жарсайского селя 1963 г. на р. Иссык // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1976. – № 1. – С. 75–85.
52. Зубаков В.А. Глобальные климатические события плейстоцена. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 288 с.
53. Илийская долина, ее природа и ресурсы / Под ред. М.И. Ломоновича. – Алма-Ата: АН КазССР, 1963. – 341 с.
54. Исследование селевого паводка, прошедшего 8–9 июля 1950 г. в бассейне р. Большая Алматинка: Технический отчет / Алма-Атинская научно-исследовательская гидрологическая обсерватория. – Инв. № 7/854. – Алма-Ата, 1950. – 147 с. – Под ред. И.П. Смирнова (архив Казгидромета)
55. Как погибло озеро // Газета «Караван». – 2003. – 16 мая. – № 20 (678). – С. 10.
56. Квятковский О. Алма-Ата в объятиях «дракона» // Казахстанская правда. – 2006. – 7 июля. – № 168–169 (25139–25140). – С. 19.
57. Керемкулов В.А. Морфометрические характеристики и классификация моренных озер // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1985. – № 9. – С. 36–47.
58. Керемкулов В.А., Киренская Т.Л. О прогнозировании прорыва моренных озер // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1985. – № 9. – С. 84–92.

59. Ким А.К., Степанов Б.С. К проблеме изучения и прогноза водоснежных селей // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1992. – № 12. – С. 45–52.
60. Киренская Т.Л. О прогнозировании ливневых селей в Заилийском Алатау // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1985. – № 9. – С. 77–84.
61. Киренская Т.Л., Степанов Б.С., Хайдаров А.Х. Капиллярное связывание грунтовых частиц и сдвиговый селевой процесс // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1983. – № 7. – С. 70–74.
62. Киренская Т.Л., Степанов Б.С., Хонин Р.В. Селевой поток в бассейне р. Большая Алматинка 19 августа 1975 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1977. – № 2. – С. 115–119.
63. Климатология / Под ред. О.А. Дроздова, В.А. Васильева, Н.В. Кобышевой. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 568 с.
64. Колесников Е. Буйные ветры казахских степей. – Алматы: Паритет, 1994. – 126 с.
65. 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.
66. Лаптев В.И. Описание селевого потока 3–4 августа 1977 г. в бассейнах рек Кумбельсу и Большой Алматинки // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1980. – № 5. – С. 55–58.
67. Лаптев М.Н., Сапунов В.Н., Фрейдлин В.С. Условия формирования и механизм водоснежных потоков // Материалы гляциологических исследований. – М., 1978. – Вып. 32. – С. 43–49.
68. Литовченко А.Ф. Катастрофический селевой паводок на р. Иссык // Метеорология и гидрология. – М.: Гидрометеоздат, 1964. – № 4. – С. 39–42.
69. Литовченко А.Ф. Некоторые особенности формирования дождевых селевых паводков на реках Заилийского Алатау // Труды КазНИГМИ. – М.: Гидрометеоздат, 1977. – Вып. 58. – С. 61–67.
70. Литовченко А.Ф. Экспериментальное изучение элементов водного баланса горных водосборов. – Киев: Вища школа, 1986. – 187 с.
71. Литовченко А.Ф., Мочалов В.П. Полевые экспериментальные исследования потерь дождевых вод на инфильтрацию в горах северного склона Заилийского Алатау. – Алма-Ата, 1964. – 195 с.
72. Марков И.Н., Бекаревич В.Е., Толстов М.И., Кострыгин Ю.Н. Некоторые сведения о двух гляциальных селевых потоках Заилийского Алатау // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1983. – № 7. – С. 99–106.
73. Медеу А., Нурланов М.Т., Заппаров М.Р., Есжанова А.С. Проблемы оптимизации селезащитных мероприятий в Казахстане // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 1999. – № 4. – С. 24–40.

74. Медеуов А. Научные основы управления селевыми процессами сейсмоактивных горных геосистем Казахстана: Автореф. дис. ... доктора геогр. наук. – Алматы, 1994. – 43 с.
75. Медеуов А., Колотилин Н.Ф., Керемкулов В.А. Сели Казахстана. – Алматы: Ғылым, 1993. – 160 с.
76. Мочалов В.П., Горин А.В. Водоснежный поток 5 июня 1991 г. на р. Кекурной // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1992. – № 12. – С. 127–133.
77. Мочалов В.П., Степанов Б.С. О режиме моренных озер и путях их мелиорации // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1980. – № 4. – С. 113–119.
78. Мочалов В.П., Степанов Б.С. О причинах образования селевых потоков в бассейне р. Иссык // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1980. – № 4. – С. 64–68.
79. Мочалов В.П., Степанов Б.С. Способы контролируемого опорожнения высокогорных селеопасных озер // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – № 8. – С. 108–117.
80. Мочалов В.П., Шевырталов Е.П. Краткие сведения о паводке на р. Малая Алматинка 28 ноября 1987 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1989. – № 11. – С. 76–78.
81. Мушкетов И.В. Верненское землетрясение 28 мая (9 июня) 1887 г. – СПб., 1890. – Тр. Геол. Комитета. – Т. 10. – Вып. 1. – 154 с.
82. Мюллер Л. Оползень в долине Вайонт // Проблемы инженерной геологии. – М.: Мир, 1967. – Вып. 9. – С. 74–141.
83. Нефедов В.Н., Кузнецов К.Л. Водоснежные потоки Магаданской области // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1983. – № 7. – С. 106–112.
84. Нурмагамбетов А. Сейсмическая история Алматы. – Алматы: ЛЕМ, 1999. – 68 с.
85. 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)
86. Обзор селевой деятельности северного склона Заилийского Алатау за 1955–1959 гг.: Технический отчет / УГМС КазССР. – Инв. № 7/271. – Алма-Ата, 1960. – 186 с. – Под ред. Л.И. Рыбкина (архив Казгидромета)
87. Обследование следов антропогенного селя в бассейне р. Каскелен: Технический отчет / КазНИГМИ. – Алма-Ата, 1988. – 91 с. – Отв. исполнитель Е.П. Шевырталов (архив Казгидромета)
88. Осипова Н.А., Казанников С.М. Оценка объемов выноса рыхлообломочного материала из бассейна р. Кумбельсу селом 1977 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1982. – № 6. – С. 81–83.

89. Отчет о научно-исследовательских, экспериментальных и полевых работах с целью ликвидации селевой угрозы в бассейне р. М. Алматинки: Отчет о НИР / КазНИИМОСК. – Алматы, 1997. – 90 с. – Отв. исполнитель Б.С. Степанов (архив Казгидромета)
90. 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.
91. Парамонов Б.А. Причины формирования катастрофического селя в верховьях руч. Жарсай 7 июля 1963 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1976. – № 1. – С. 86–87.
92. Перов В.Ф. Селевые явления западной части плато Путорана // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата, 1981. – С. 212–219.
93. Перов В.Ф. Селевые явления на территории СССР. Итоги науки и техники. Серия Гидрология суши. – Т 7. – М., ВИНТИ, 1989. – 149 с.
94. Перов В.Ф. Селевые явления. Терминологический словарь. – М.: МГУ, 1996. – 45 с.
95. 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.
96. 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.: Гидрометеоздат, 1980. – № 4. – С. 57–63.
97. Попов Н.В. Количественная оценка и причины формирования селей в бассейне реки Жарсай // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата: Казахстан, 1981. – С. 158–166.
98. Попов Н.В. О селеопасных озерах гляциальной зоны Заилийского Алатау // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата, 1984. – С. 96–105.
99. Попов Н.В. Прорывные гляциальные сели и борьба с ними в горах Северного Тянь-Шаня // Материалы гляциологических исследований. – М., 1987. – Вып. 59. – С. 188–193.
100. Противоселевая защита в Казахстане. – Алма-Ата, 1990. – 31 с.
101. Раушенбах И.О. Селевые явления на территории СССР // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1980. – № 4. – С. 90–102.
102. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики / Т. 13. – Вып. 2. Центральный и южный Казахстан. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 472 с.

103. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 13. Центральный и Южный Казахстан. Вып. 2. Бассейн оз. Балхаш. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 644 с.
104. Ржевский Б.Н. Гидронапорные лавины и актуальность их изучения // Материалы гляциологических исследований. – М., 1970. – Вып. 16. – С. 107–111.
105. Руководство по организации и проведению работ по изучению селей на территории Республики Казахстан. – Алматы, 1998. – 143 с.
106. Рунич А.В. Снежные сели и их отличия от лавин. – В кн.: Инженерная гляциология / Труды I Всесоюзного координационного совещания по инженерной гляциологии. – Апатиты, 1973. – С. 96–101.
107. Сазонов В.А., Соседов И.С. Фильтрационные свойства горных почв на северном склоне Заилийского Алатау // Гидрофизические исследования в горных районах Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1969. – С. 12–18.
108. Сваричевская З.А. Геоморфология Казахстана и Средней Азии. – Л.: ЛГУ, 1965. – 296 с.
109. Северский И.В. Снежные лавины Заилийского и Джунгарского Алатау. – Алма-Ата: Наука, 1978. – 256 с.
110. Северский Э.В. Влияние растительности на характер сезонного промерзания и протаивания в горах Заилийского Алатау. – В кн.: Криогенные явления высокогорий. – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 73–85.
111. Седых Р.В., Глуханьков П.Б., Земс А.Э. Селезащита г. Алма-Аты (опыт проектирования и строительства) / Сборник докладов X Всесоюзной конференции по селевым потокам и горным русловым процессам. – Ереван, 1968. – С. 11–24.
112. Сейнова И.Б., Золотарев Е.А. Ледники и сели Приэльбрусья. (Эволюция оледенения и селевой активности). – М.: Научный мир, 2001. – 204 с.
113. Селевой поток 3–4 августа в бассейне р. Большая Алматинка: Ежегодник «Селевые потоки на территории КазССР за 1977 г.» / УГМС КазССР. – № 7/1204. – Алма-Ата, 1977. – С. 1–33 (архив Казгидромета)
114. Современное экологическое состояние бассейна озера Балхаш / Под ред. Т.К. Кудекова. – Алматы: Каганат, 2002. – 388 с.
115. Справочник по климату СССР. Вып. 18. КазССР. Ч.IV. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 550 с.
116. Срибный М.Ф., Думитрашко Н.В. О задачах изучения селевых потоков и защиты от них / Сборник докладов X Всесоюзной конференции по селевым потокам и горным русловым процессам. – Ереван, 1968. – С. 7–9.
117. Степанов Б.С. Заполнение селехранилищ вязкопластическими селевыми смесями // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1989. – № 11. – С. 23–27.

118. Степанов Б.С. Основные закономерности формирования, движения и остановки селей: Автореф. дис. ... доктора геогр. наук. – Алматы, 1999. – 48 с.
119. Степанов Б.С. Основные характеристики селевых потоков и селевой массы. Методы измерений // Труды КазНИГМИ. – М.: Гидрометеиздат, 1982. – Вып. 79. – 137 с.
120. Степанов Б.С. Явление скачкообразного изменения плотности селевых потоков. Заявка на открытие // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1992. – № 12. – С. 141–172.
121. Степанов Б.С., Степанова Т.С. Механика селей. – М.: Гидрометеиздат, 1991. – 380 с.
122. Степанов Б.С., Хайдаров А.Х., Яфязова Р.К. Механизмы, приводящие к формированию селей дождевого генезиса в высокогорной зоне Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2001. – № 1–2. – С. 74–81.
123. 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.
124. Степанов Б.С., Хайдаров А.Х., Яфязова Р.К. Новая стратегия защиты от селевых потоков // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 1999. – № 2. – С. 51–65.
125. Степанов Б.С., Хайдаров А.Х., Яфязова Р.К. Особенности формирования катастрофических селей дождевого генезиса на северном склоне Заилийского Алатау / Географические основы устойчивого развития Республики Казахстан. – Алматы: Ғылым, 1998. – С. 516–520.
126. Степанов Б.С., Хайдаров А.Х., Яфязова Р.К. О масштабах оледенения Заилийского Алатау в верхнем плейстоцене // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 1999. – № 3. – С. 127–133.
127. Степанов Б.С., Хайдаров А.Х., Яфязова Р.К. Свершившиеся и потенциальные постсейсмические катастрофы на Северном Тянь-Шане / Проблемы предотвращения последствий разрушительных землетрясений. – Доклады второго Казахстанско-Японского семинара. – 23–25 сентября 2002 г., г. Алматы. – Алматы: Эверо, 2003. – С. 88–94.
128. Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Климат и ландшафты центральной части северного склона Заилийского Алатау / Современные проблемы геоэкологии и созологии. – Алматы, 2001. – С. 138–142.
129. Степанов Б.С., Яфязова Р.К. К формированию рельефа северного склона Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2002. – № 2. – С. 100–113.

130. Степанов Б.С., Яфязова Р.К. О влиянии селеформирующих факторов на объемы конусов выноса // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2002. – № 4. – С. 116–124.
131. Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Особенности формирования конусов выноса северного склона Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 1995. – № 3. – С. 18–28.
132. Степанов Б.С., Яфязова Р.К. О роли климата в селевой активности северного склона Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 1995. – № 4. – С. 46–59.
133. Степанов Б.С., Яфязова Р.К. Радикальный пересмотр стратегии защиты от селей – необходимое условие устойчивого развития горных и предгорных районов Казахстана / Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы гидрометеорологии и экологии». – Алматы, 2001. – С. 32–35.
134. Степанова Т.С. Антропогенные сели // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1992. – № 12. – С. 89–101.
135. Степанова Т.С. О роли дисперсности селеформирующих грунтов в образовании селей // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1985. – № 9. – С. 23–32.
136. Степанова Т.С. Цепной селевой процесс и образование очагов // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1989. – № 11. – С. 43–48.
137. Сыдыков Ж.С., Вардугин В.Н., Кан М.С., Ким Э.К., Малахов В.Д. Роль гидрогеологических условий в формировании селевых потоков на северном склоне Заилийского Алатау // Вестник АН КазССР. – Алма-Ата, 1989. – № 12. – С. 29–34.
138. Тажибаев Л.Е., Хегай Э.А. Гранулометрический состав селевых наносов в селехранилищах Алма-Атинской области // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата, 1986. – С. 46–51.
139. Тихомиров Ю.П., Шевырталов Е.П. Некоторые характеристики гляциального селя, прошедшего в бассейне р. Сарканд // Селевые потоки. – М.: Гидрометеоздат, 1985. – № 9. – С. 132–138.
140. Токмагамбетов Г.А. Ледники Заилийского Алатау. – Алма-Ата: Наука, 1976. – 367 с.
141. Токмагамбетов Т.Г. Распределение моренных отложений на северном склоне Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2003. – № 2. – С. 110–117.
142. Тронов М.В. Ледники и климат. – Л.: Гидрометеоздат, 1966. – 408 с.
143. Флейшман С.М. Сели. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – 352 с.
144. Флейшман С.М. Сели. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 312 с.

145. Хайдаров А.Х., Шевырталов Е.П. Селевые явления в песках Жаманкум 28–29 января 1988 г. // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1989. – № 11. – С. 49–59.
146. Хегай А.Ю. Укрощение «черного дракона». – Алма-Ата: Казахстан, 1988. – 2 с.
147. Хегай А.Ю., Земс А.Э., Зиневич Ю.Н., Квасов А.И. Развитие представлений о природе селевых явлений и характере необходимых противоселевых мероприятий в районе г. Алма-Аты // Проблемы противоселевых мероприятий. – Алма-Ата, 1986. – С. 62–71.
148. Хонин Р.В. О морфологии и распространении селевых очагов в Заилийском Алатау // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1977. – № 2. – С. 84–93.
149. Хонин Р.В., Балабаев Ф.Г., Каплан М.М., Булатов В.М., Гончарова Л.В., Калашникова Е.Н. Селевые явления северного полушария // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1982. – № 6. – С. 97–126.
150. Черкасов П.А. Грязе-каменный поток в долине Малой Алматинки // Известия АН КазССР. Серия геол. – Алма-Ата, 1953. – № 121. – Вып. 16. – С. 118–120.
151. Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. – М.: Недра, 1980. – 296 с.
152. Шушарин В.И., Марков И.Н. Наблюдения за формированием гляциальных селей в бассейне р. Средний Талгар // Селевые потоки. – М.: Гидрометеиздат, 1976. – № 1. – С. 98–108.
153. Щукин И.С. Четырехязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии. – М.: Советская энциклопедия, 1980. – 703 с.
154. Яблонский В.В. Сель в Киеве // Свет (Природа и человек). – 1991. – № 7. – С. 32–33.
155. Яфязова Р.К. Влияние климата на селеформирующие факторы // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 1997. – № 3. – С. 209–216.
156. Яфязова Р.К. Глобальное потепление климата и селевая активность. Проблемы адаптации // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2001. – № 3–4. – С. 97–106.
157. Яфязова Р.К. Загадка лессового покрова конусов выноса рек северного склона Заилийского Алатау // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2001. – № 1–2. – С. 155–160.
158. 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.

159. Яфязова Р.К. О конусах выноса горных рек Заилийского Алатау / Каз.н-и. гидромет.ин-т (КазНИГМИ). – Алматы, 1995. – 8 с.: 4 ил. – Деп. в КазгосИНТИ 30.03.95, № 5982-Ка95.
160. Яфязова Р.К. Объем конуса выноса как показатель селевой активности // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2002. – № 2. – С. 90–99.
161. Яфязова Р.К. Основные закономерности формирования селевых конусов выноса (на примере северного склона Заилийского Алатау): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Алматы, 1998. – 21 с.
162. Яфязова Р.К. Особенности механизмов формирования конусов выноса горных рек // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 1996. – № 2. – С. 175–187.
163. Яфязова Р.К. Селевая активность в Заилийском Алатау в прошлом, настоящем и будущем / Географические основы устойчивого развития Республики Казахстан. – Алматы: ФЫЛЫМ, 1998. – С. 511–515.
164. Climate Change 2001: The Synthesis Report – Contribution of Working Group I to the IPCC Third Assessment Report, 2001. p. 21.
165. Geological Survey. Peru Was Hit by Massive Avalanche Triggered by Earthquake. – «Mineral Information Service California Division», 1970, vol. 23, No 10, p. 203–207.
166. 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.
167. Lliboutry L. Les catastrophes glaciaires. – «La Recherche», Mai 1971, vol. 2, No 12, p. 417–423.
168. Takahashi T. Mechanical characteristics of debris flow // Proc. of ASCE. – 1978. – Vol. 104, HY 8. – P. 1153–1169.
169. 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.

Научное издание

Яфязова Роза Кайюмовна

**ПРИРОДА СЕЛЕЙ ЗАИЛИЙСКОГО АЛАТАУ
ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ**

На обложке: Фрагмент селевого конуса выноса (сель в бассейне р. Средний Талгар
21 июня 1979 г.). Фото из архива Казгидромета

Подписано к печати 07.02.2007.

Формат 70×100/16.

Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Объем 10,0 печ. л.

Тираж 500 экз. Заказ № 84.

Отпечатано с готовых файлов заказчика
в ТОО Полиграфкомбинат «Корпорация Атамұра»
Республики Казахстан
050002, г. Алматы, ул. Макатаева, 41.

ДЛЯ ЗАМЕТОК



Яфязова Роза Кайюмовна

В 1987 году окончила географический факультет Казахского государственного университета. В 1998 году защитила кандидатскую диссертацию "Основные закономерности формирования селевых конусов выноса".

В настоящее время ведущий научный сотрудник отдела гидрологических прогнозов Гидрометцентра РГП "Казгидромет".

Участник многих экспедиционных исследований в Северном и Западном Тянь-Шане, Памиро-Алае, Крыму.

Автор 58 опубликованных научных работ. Область научных интересов влияние климата на селевую активность, рельефообразующая роль селей.