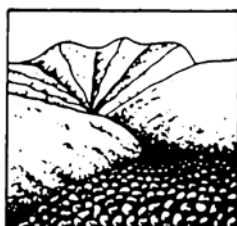


СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
8-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 6–10 октября 2025 г.



Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2025

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 8th International Conference

Tbilisi, Georgia, 6–10 October 2025



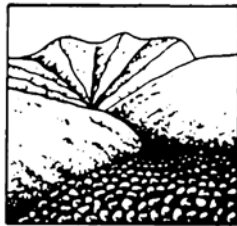
Edited by
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
Moscow
2025

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

მე-8 საერთაშორისო კონფერენციის
მასალები

თბილისი, საქართველო, 6-10 ოქტომბერი, 2025



რედაქტორები
ს. ს. ჩერნომორეც, გ. ვ. გავარდაშვილი, კ. ს. ვისხაჯიევა

შპს „გეომარკეტინგი“
მოსკოვი
2025

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2025. 496 с.

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC, 2025. 496 p.

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა. მე-8 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო. – პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი, კ.ს. ვისხაჯიევა. – მოსკოვი: შპს „გეომარკეტინგი“, 2025. 496 ს.

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), Г.В. Гавардашвили (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (M.V. Lomonosov Moscow State University), G.V. Gavardashvili (Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University), K.S. Viskhadzhieva (M.V. Lomonosov Moscow State University).

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).

Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman's book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

ISBN 978-5-6053539-4-2

© Селевая ассоциация
© Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава
Грузинского технического университета

© Debris Flow Association
© Ts. Mirtskhulava Water Management Institute
of Georgian Technical University

© ღვარცოფების ასოციაცია
© საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა
მეურნეობის ინსტიტუტი



Инженерно-геологическая характеристика селевых отложений 2023 г. у подножия вулкана Шивелуч (Камчатка)

О.С. Барыкина¹, В.И. Фролов², Ю.В. Фролова¹, Э.Э. Сулейманова¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, barykinaos@my.msu.ru, ju_frolova@mail.ru

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
Россия

Аннотация. Вулкан Шивелуч – один из наиболее активных на Камчатке. За последние 25 лет здесь случилось более десяти крупных извержений. Несмотря на удаленность от населенных пунктов, его высокая активность и регулярно происходящие селевые потоки представляет серьезную опасность для жизнедеятельности п. Ключи и г. Усть-Камчатск, в том числе, дорожной инфраструктуры региона, перекрывая единственную региональную трассу в промышленный г. Усть-Камчатск, а также ряд дорог местного значения. Для инженерно-геологической характеристики селевых отложений, сформировавшихся на склоне и у подножия Шивелуча в мае 2023 г., были отобраны образцы крупнообломочных валунно-галечных включений и рыхлого дисперсного заполнителя. Отложения были изучены на макро- и микроуровне, определены минеральный (с помощью рентгеноструктурного анализа и описания породы в шлифах) и гранулометрический составы, физические и физико-механические свойства. Показано, что и в дисперсной фазе, и в крупных обломках главными породообразующими минералами являются плагиоклазы, также присутствуют роговая обманка и вулканическое стекло; глинистые минералы отсутствуют. В составе дисперсного заполнителя преобладают частицы мелко- и тонкозернистой песчаной и крупнопылевой фракций. По классификации Н.А. Качинского селевой матрикс можно классифицировать как супесь, с минеральной плотностью 2,70 г/см³. Крупнообломочные включения представляют собой высокопористые андезиты, с минеральной плотностью 2,65–2,72 г/см³, что соответствует андезитовому составу. Согласно инженерно-геологическим классификациям они относятся к грунтам средней и низкой плотности, высокой пористости, по прочности на одноосное сжатие классифицируются как полускальные грунты низкой прочности и скальные малопрочные грунты.

Ключевые слова: селевые процессы, условия формирования, селевые отложения, дисперсный заполнитель, крупнообломочные валунно-галечные разности, минеральный состав, физические и физико-механические свойства

Ссылка для цитирования: Барыкина О.С., Фролов В.И., Фролова Ю.В., Сулейманова Э.Э. Инженерно-геологическая характеристика селевых отложений 2023 г. у подножия вулкана Шивелуч (Камчатка). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 48–60.

Engineering-geological characteristic of the 2023 debris flow deposits of the Shiveluch volcano (Kamchatka)

O.S. Barykina¹, V.I. Frolov², J.V. Frolova¹, E.E. Suleymanova¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, barykinaos@my.msu.ru,
ju_frolova@mail.ru

²Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch, Russian Academy of
Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia



Abstract. Shiveluch is one of the most active volcanoes in Kamchatka. Over the past 25 years, more than ten major eruptions have occurred here. Despite its remoteness from populated areas, its high activity and regularly occurring debris flows pose a serious threat to the livelihoods of Klyuchi and Ust-Kamchatsk, including the region's road infrastructure, blocking the only regional highway to the fishing town of Ust-Kamchatsk, as well as a number of local roads. To characterize the debris flow formations of the Shiveluch slope, samples of different dispersion were taken from their strata, which were formed in May 2023. The samples were divided into two fundamentally different groups: loose dispersed filler and coarse-grained boulder-pebble rounded inclusions. The soils were studied at the macro and micro levels, the mineral (using X-ray diffraction analysis and description of sample slots) and granulometric compositions, physical and mechanical properties were determined. It is shown that plagioclases are the main rock-forming minerals in both the dispersed phase and large fragments, hornblende and volcanic glass are also present; clay minerals are absent. The composition of the dispersed filler is dominated by particles of medium and fine sand and coarse-silt fractions. According to N.A. Kachinski's classification, the debris flow matrix can be classified as a sandy loam with a particle density of 2.70 g/cm^3 . Coarse-grained inclusions are highly porous andesites with a particle density of $2.65\text{--}2.72 \text{ g/cm}^3$, which corresponds to the andesite composition. They belong to soils of medium and low density, high porosity; in terms of uniaxial compressive strength, they are classified as low-strength semi-basement soils and low-strength rock soils.

Key words: *debris flow, conditions of formation, debris flow deposits, dispersed filler, coarse-grained boulder-pebble rounded inclusions, mineral composition, physical and mechanical properties*

Cite this article: Barykina O.S., Frolov V.I., Frolova J.V., Suleymanova E.E. Engineering-geological characteristic of the 2023 debris flow deposits of the Shiveluch volcano (Kamchatka). In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 48–60.

Введение

Сели, возникающие на вулканах Камчатки, являются опасными и зачастую разрушительными экзогенными процессами. Их развитие на склонах и у подножия вулкана Шивелуч обусловлено рядом факторов: во-первых, вулканической активностью региона, способствующей накоплению мощных толщ рыхлого пирокластического материала, который легко вовлекается в движение при интенсивных атмосферных осадках или при таянии снега и ледников; во-вторых, высокой влажностью камчатского региона, что играет большую роль в подготовке селевых процессов; в-третьих, наличием не менее пяти ледников на склонах вулкана [Маневич, 2024], при таянии которых происходит инфильтрация воды в рыхлые вулканические отложения, что снижает их прочность и ведёт к зарождению селя и в-четвертых, склоны Шивелуча имеют большой уклон, и, сложенные несцементированными пирокластическими отложениями, легко подвергаются размыву и транспортировке под действием воды [Черноморец, Сейнова и др., 2010].

Наравне с современными исследованиями, особое значение в изучении селевых процессов на Камчатке имеют исторические наблюдения. С XVIII в. отмечалась высокая активность селевых потоков, связанная с извержениями крупных вулканов региона. В настоящее время используются различные методы мониторинга, включая дистанционное зондирование, сейсмологические и гидрометеорологические наблюдения, позволяющие точнее прогнозировать возможные катастрофические события. Институт Вулканологии и сейсмологии ДВО РАН ведет постоянные исследования, направленные на изучение закономерностей формирования селевых потоков. Одной из важнейших прикладных задач является разработка мероприятий



инженерной защиты – селезащитных дамб, каналов и барьеров, предназначенных для ослабления разрушительного воздействия селевых потоков.

В целом, селевые процессы на вулканах Камчатки представляют собой сложное явление, обусловленное сочетанием эндогенных и экзогенных факторов. Активный вулканизм, особые геоморфологические условия, климатические особенности и наличие значительных запасов льда и снега делают регион крайне уязвимым к селевым процессам.

Сели, образующиеся на вулкане Шивелуч, беспрепятственно перекрывают единственную жизненно важную региональную трассу в промысловый г. Усть-Камчатск с населением около 5000 человек, а также ряд дорог местного значения, в том числе, на активно разрабатываемое Озерновское золоторудное месторождение и к объектам оборонной инфраструктуры.

Инженерно-геологические условия территории вулкана Шивелуч

Вулканический массив Шивелуч, занимающий не менее 1300 км² в северной части Центральной Камчатской депрессии, представляет собой уникальный объект, характеризующийся сложным взаимодействием геоморфологических, геологических, гидрогеологических и геокриологических факторов. Этот активный вулкан, расположенный на левом берегу реки Камчатки, находится в 50 км на ССВ от пос. Ключи и в 98 км на СЗ от г. Усть-Камчатка, а его возраст оценивается в 60–70 тыс. лет. В составе массива выделяются два главных структурных элемента: Старый Шивелуч (3283 м) и действующий в голоцене Молодой Шивелуч (2763 м, также называемый Четвёртая вершина), при этом высота активного эруптивного центра Молодого Шивелуча составляла около 2500 м до пароксизмального извержения 2023 г. [Горбач, Портнягин, 2011; Сляднев, Литвинов, 1989].

Рельеф вулкана отличается резким расчленением склонов эрозионными формами временных водотоков. Верхняя часть конуса покрыта небольшими ледниками и фирновыми полями. Климатическая обстановка характеризуется муссонным режимом, при этом среднегодовая температура в районе, согласно данным метеостанции в пос. Ключи, составляет –2,5°C, а максимальные осадки выпадают в июле и августе, достигая до 19,8 мм в сутки при среднем годовом значении 380,7 мм (необходимо отметить, что в последнее время современная климатическая обстановка несколько изменилась, особенно по периоду выпадения максимальных осадков – сейчас это конец мая – начало июля, а август-сентябрь, как правило, сухие). Снежный покров устанавливается в долинах рек уже в начале ноября, в горной части – к началу октября, а в высокогорной зоне – в середине сентября, однако на Шивелуче снег сохраняется круглый год [Сляднев, Литвинов, 1989].

Геологическое строение вулкана Шивелуч определяется его расположением на северо-восточном окончании Восточно-Камчатского вулканического пояса и выделяется как отдельная тектоническая структура. Постройка вулкана преимущественно сложена отложениями четвертичного возраста. Верхнее звено четвертичной системы представлено андезитами, туфами среднего состава и андезибазальтами, формирующими основу постройки Старого Шивелуча, который имеет крутосклонный конус, выполаживающийся к основанию. Фундамент вулкана, предположительно, залегает в неогеновых породах (N₂tm), на которые наложены позднечетвертичные ледниковые отложения и эксплозивные вулканические материалы, мощностью около 3000 м [Сляднев, Литвинов, 1989]. Современное звено четвертичной системы включает нижнюю и среднюю части, где доминируют базальты, андезибазальты, андезиты и их туфы, отложения направленных взрывов, что особенно заметно в современной постройке Молодого Шивелуча. Потоки андезибазальтов располагаются на юго-западном склоне вулкана, при этом их мощность достигает 3–5 м, а в отдельных случаях – до 40 м. Эксплозивные отложения, включающие щебень, глыбы и вулканический песок с примесью пемзы, имеют мощность до 30–35 м и являются важной частью вулканической постройки.



Геоморфологические условия формирования селевых процессов на Шивелуче напрямую связаны с вулканической активностью, которая создает условия для накопления рыхлого материала, подверженного дальнейшему размыву и перемещению под воздействием водотоков. Рельеф сформирован в результате вулканической деятельности в плейстоцен-голоценовое время, а донная и боковая эрозия рек и временных водотоков существенно изменяет облик вулканической постройки. Склоны имеют разные уклоны – от крутых до пологих участков у основания. В южной части постройки сформировалась взрывная кальдера диаметром около 10 км, внутри которой расположен вулкан Молодой Шивелуч с действующим кратером диаметром около 2 км, что является важным фактором формирования селевых потоков.

Гидрогеологические и геокриологические условия оказывают существенное влияние на процессы селеформирования. Рыхлые четвертичные отложения, имеющие высокую водопроницаемость, способствуют быстрому инфильтрационному поступлению воды, что приводит к насыщению вулканических пород и последующему их размыву. При этом распределение осадков в регионе крайне неравномерно, а мощность снежного покрова в горных районах достигает 2–3 м, а на седловинах вулканов – до 10–15 м [Горбач, Портнягин, 2011; Сляднев, Литвинов, 1989].

Селевой поток после катастрофического извержения 2023 г.

Начало последнего эксплозивного извержения вулкана Шивелуч, одного из сильнейших за последние 60 лет, датируется 10 апреля 2023 г. [Гирина, Лупян и др., 2023]. При извержении вершинный экструзивный купол вулкана был практически разрушен и раскаленные обломки покрыли значительную область южного и юго-восточного подножия вулканического массива. По долине р. Кабеку сошел крупный пирокластический поток, отложения которого остаются нагретыми по настоящее время. Пепловая туча несколько раз меняла направление, в результате практически все склоны вулкана были покрыты слоем горячего пепла мощностью до 15 см. В результате всех этих событий сформировалось большое количество рыхлого материала. Следует особо отметить, что на момент извержения все склоны вулкана, за исключением эксплозивного кратера, находились под достаточно мощным снежным покровом.

Селевой поток, рассматриваемый в работе, согласно спутниковым снимкам миссии Sentinel-L2A, проявлял наибольшую активность в период с 15 по 27 мая 2023 г., и к концу мая достиг автомобильной трассы Ключи – Усть-Камчатск в 30 км на юго-запад от активного кратера вулкана (рис. 1). На спутниковых снимках отчетливо видны основные направления схода селевых потоков по каньонам сухих рек Байдарная и Каменская в юго-западном направлении от активного кратера вулкана Шивелуч, которые неоднократно происходили и ранее [Сейнова, Черноморец, 2010].

Из личных наблюдений В.И. Фролова: 15 мая наблюдалось много воды на дороге, что характеризует типичную обстановку в районе вулкана весной 2023 г. Были и более ранние потоки севернее по дороге ИП (например, 3 мая 2023 г.). При повторном наблюдении точки 22 мая 2023 г. дорога в области влияния селевого потока была перекрыта: наблюдался мощный слой воды со взвесью, течение происходило в южном и юго-восточном направлении. Часть дороги выглядела сухой, но под поверхностным слоем, на котором можно было стоять и даже проезжала техника, очевидно, находилась водонасыщенная масса (рис. 2).

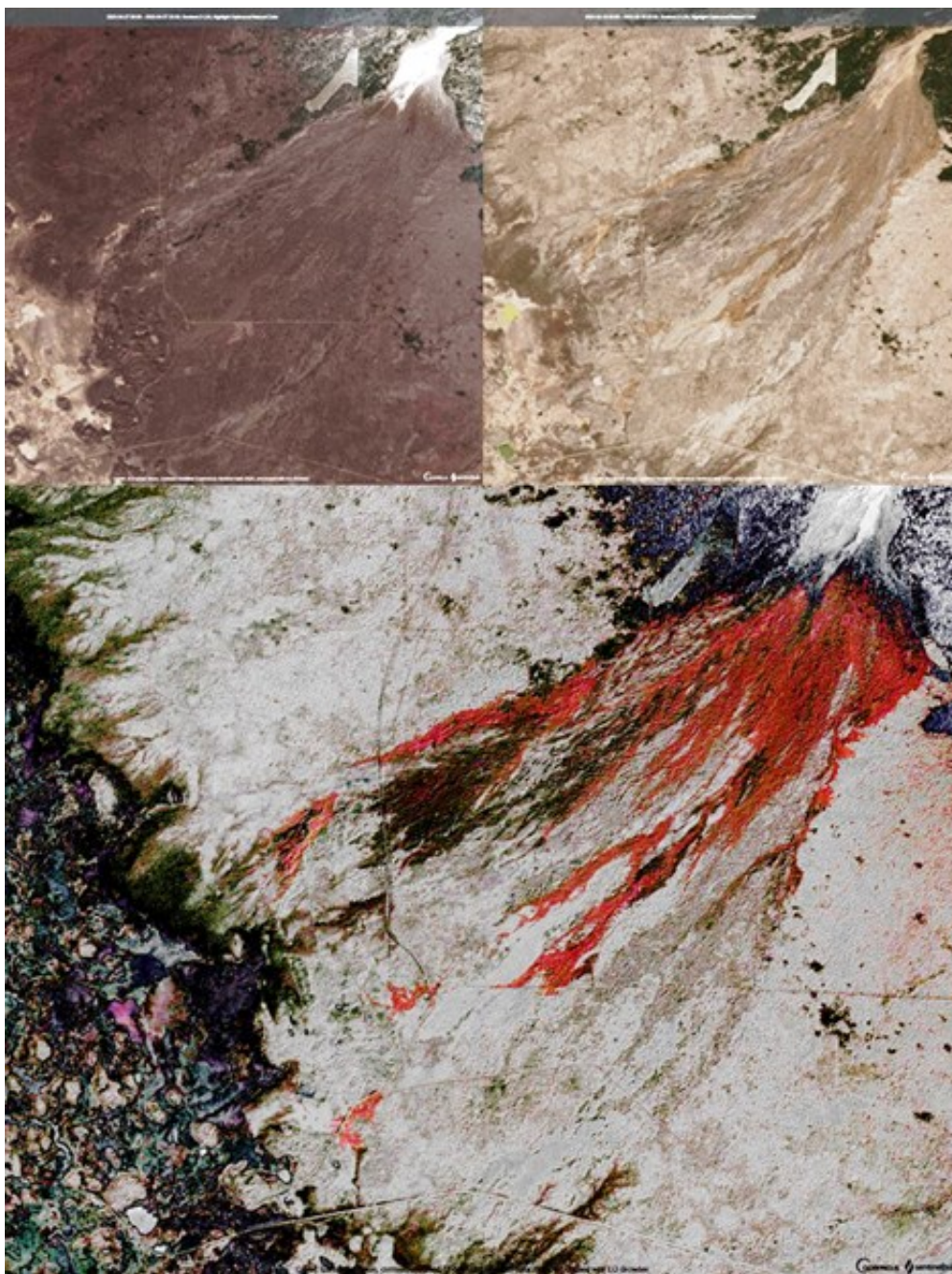


Рис. 1. Спутниковые снимки Sentinel L2A от 27 апреля (а) и 19 мая 2023 г. (б) и их разностный снимок (в), на котором красным цветом выделена видимая область покрытия территории селевыми массами. Даты снимков выбраны исходя из отсутствия облачности, движение селевых масс продолжалось после 19 мая 2023 г.

Точная дата возникновения потока неизвестна, однако согласно сейсмическим данным – 20 мая 2023 г. наиболее вероятная дата пика селевой активности. Согласно спутниковым данным, основное событие началось к 17 мая 2023 г., затем до 22 мая 2023 г. поток продолжал продвигаться в сторону трассы и дороги ИП. В момент наблюдений продолжалось достаточно сильное течение по дороге с дальнейшим поворотом потока на юго-восток к трассе Ключи – Усть-Камчатск (на трассе отложений потока не наблюдалось).



Рис. 2. Отложения селевого потока, наблюдаемые в точке отбора образцов. Фото В.И. Фролова от 15 мая 2023 г.

Точка отбора образцов находилась в 27 км от центра вулкана по прямой. Мощность отложений – до 1 метра и более. В точке наблюдения было зафиксировано большое количество отложений разной дисперсности, от мелкого песка до крупных окатанных включений (рис. 3).

Отобранные разности отложений селевого потока были разделены на две принципиально отличающиеся группы: рыхлый дисперсный заполнитель и крупнообломочные валунно-галечные включения.



Рис. 3. Территория исследования. Желтая линия показывает предположительную границу отложений селевого потока, выделенную по спутниковым данным. Красной линией отмечено положение дороги (по материалам В.И. Фролова)

Дисперсный заполнитель представлен пылевой супесью тёмно-серого цвета с включениями окатанных обломков эффузивных пород (предположительно андезитового-андезибазальтового состава) размером от 1 до 3,5 мм (рис. 4). Песчаные и пылеватые частицы имеют схожий минеральный состав: наблюдаются неокатанные кристаллы роговой обманки и слабо окатанные зерна плагиоклазов. Грунт находился в нарушенном сложении без сохранения естественной влажности, однако стоит отметить, что в пробе встречались достаточно крупные (до 10–12 мм) спрессованные агрегаты, крошащиеся в руках. По всей видимости, они образовались в результате сдавливания и потери влаги в процессе транспортировки.



Рис. 4. Дисперсная часть отложений селевого потока

Крупнообломочные валунно-галечные включения представлены округлыми хорошо окатанными обломками андезитов (рис. 5). Преобладают обломки размером от 2 до 7 см. Они имеют схожий внешний вид: цвет от светло-серого до серого, обладают небольшой плотностью и высокой пористостью. Структура пород порфировая. Вкрапленники плагиоклазов имеют призматическую форму, размер от 0,5 до 2 мм и визуально занимают около 15%. Темноцветные минералы представлены кристаллами удлиненной формы (до 3 мм) и визуально занимают около 10%.

Результаты исследований

Исследование минерального состава с помощью рентгеноструктурного анализа (аналитик – с.н.с. В.В. Крупская)

Крупнообломочные включения можно разделить на две группы: с преобладанием в составе плагиоклазов и преобладанием аморфного вещества (таблица 1). Амфиболов во всех четырех образцах содержится примерно одинаковое количество (12–13%). Также во всех образцах в незначительных количествах содержится микроклин.

Минеральный состав дисперсной части в целом аналогичен составу крупнообломочных разностей, однако отличается большим количеством плагиоклазов (76%) и меньшим содержанием рентгеноаморфного вещества. Особо следует отметить, что в составе дисперсного заполнителя не было обнаружено глинистых минералов.

Таблица 1. Минеральный состав селевых отложений юго-западного склона влк. Шивелуч (аналитик – с.н.с. В.В. Крупская)

Образцы		Плагиоклазы (альбит)	КПШ (микроклин)	Амфиболы	Рентгеноаморфное вещество
Крупно- обломочные включения	Первая группа	70	3	9	18
		69	2	10	19
	Вторая группа	29	2	10	59
		34	5	11	50
Дисперсный заполнитель		76	6	5	13



Изучение образцов в шлифах позволило разделить крупнообломочные включения на две группы. Для первой группы (рис. 6) характерна порфировая структура и беспорядочное расположение вкрапленников. Присутствуют вкрапленники роговой обманки, идентифицированные по изометричной форме кристаллов, часто ромбической; по углу погасания $10\text{--}15^\circ$; при наличии двух направлений спайности угол составляет около 115° .



Рис. 5. Крупнообломочное валунно-галечное включение и выбуренные из него цилиндрические образцы

Светлые минералы представлены плагиоклазами с характерным двойникованием. Присутствуют как крупные вкрапленники размером до 3 мм, так и мелкие, вплоть до микролитов. Кроме того, в обоих образцах присутствует мелкие зерна рудных минералов, а также одиночные кристаллы оливина. Основная масса гиалопилитовая, представлена вулканическим стеклом с микролитами плагиоклазов.

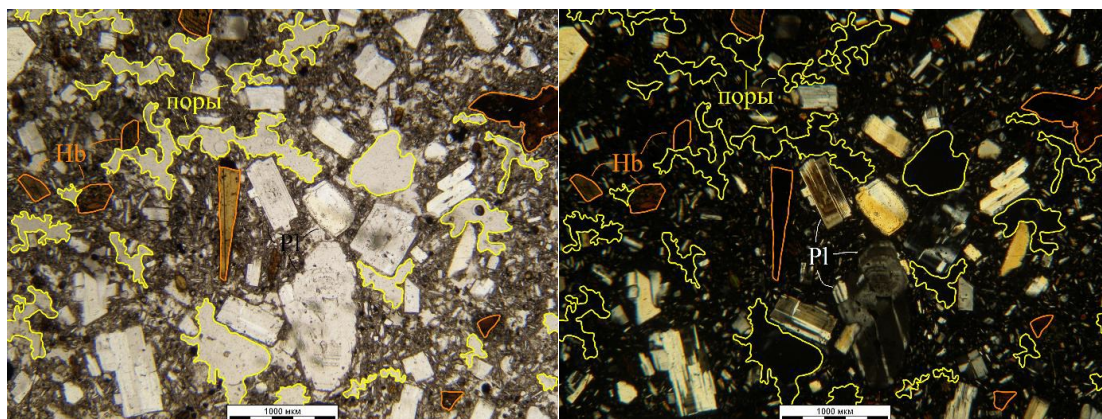


Рис. 6. Общий вид крупнообломочных включений первой группы в шлифе: при одном николе (слева) и в скрещенных николях (справа). Обозначения некоторых элементов: поры (жёлтым), роговая обманка Нб (оранжевым), плагиоклазы Pl (чёрным/ белым), оливин Ol (зелёным)



У образцов второй группы (рис. 7) аналогичная порфировая структура, текстура более беспорядочная. Содержание темноцветных минералов составляет 15–20%. В большем количестве, по сравнению с образцами первой группы, содержится вкрапленников рудных минералов. Основное отличие заключается в основной массе: у образцов данной группы она представлена пузыристым вулканическим стеклом, с явно прослеживающейся флюидальной текстурой.

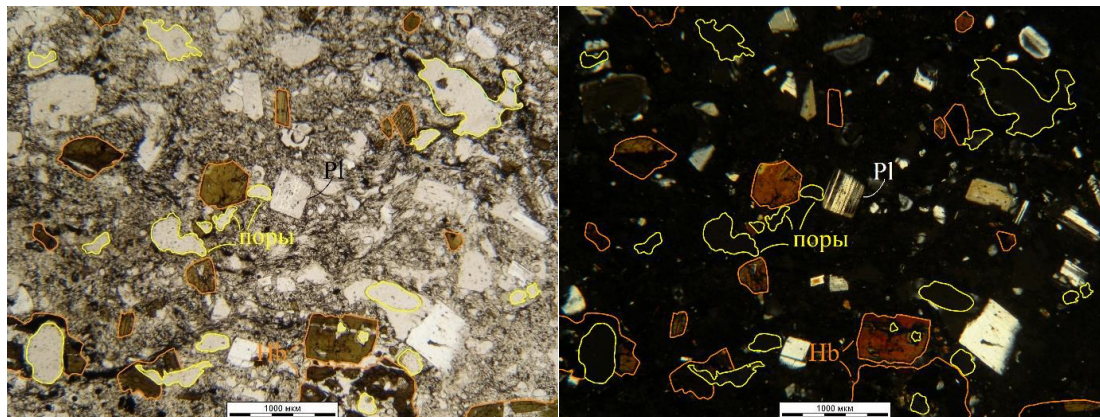


Рис. 7. Общий вид крупнообломочных включений второй группы в шлифе: в обычном свете (слева) и в скрещенных николях (справа). Обозначения некоторых элементов: поры (жёлтым), роговая обманка Нб (оранжевым), плагиоклазы П1 (чёрным/ белым), оливин О1 (зелёным)

Результаты исследования крупнообломочных включений с помощью рентгеновской компьютерной томографии (аналитик – инж. А.Б. Ермолинский)

Исследованы андезиты крупных обломков. Исследование проводилось на образцах двух размеров (рис. 8): диаметром 5 мм (для съёмки с разрешением 8 μ) и 15 мм (для съёмки с разрешением 30 μ). С увеличением детальности съёмки возрастает способность дифференцировать участки с разной плотностью более детально, но теряется представительность образца в связи с масштабным эффектом. Наименее плотные участки, окрашенные на модели в синий цвет, являются порами. Следует отметить, что на КТ видны только относительно крупные поры, мелкие же невозможно отличить от основной массы. Участки средней плотности, окрашенные на модели в серый цвет, соответствуют вкрапленникам плагиоклазов. Но стоит отметить, что видны лишь самые крупные вкрапленники, в то время как микролиты основной массы не идентифицируются. Участки средней и повышенной плотности были идентифицированы как плагиоклазы и роговая обманка на основе разности плотностей и конфигурации кристаллов. Самые плотные мелкие включения, окрашенные на модели в красный цвет, это рудные минералы, их содержание составляет 0,5–0,6% для всех образцов.

Микроагрегатный и гранулометрический составы дисперсного заполнителя

Анализ микроагрегатного и гранулометрического составов дисперсного заполнителя показал (рис. 9) преобладание частиц мелко- и тонкозернистой песчаной и крупнопылевой фракций. По Н.А. Качинскому грунт был классифицирован как супесь (физическая глина — 12%; физический песок — 88%). Коэффициент неоднородности по данным гранулометрического анализа пипеточным методом составляет $V = 10$, ареометрическим — $V = 17$. По ГОСТ 25100-2020 такие грунты относят к неоднородным. Минеральная плотность дисперсного образца составляет 2,70 г/см³.

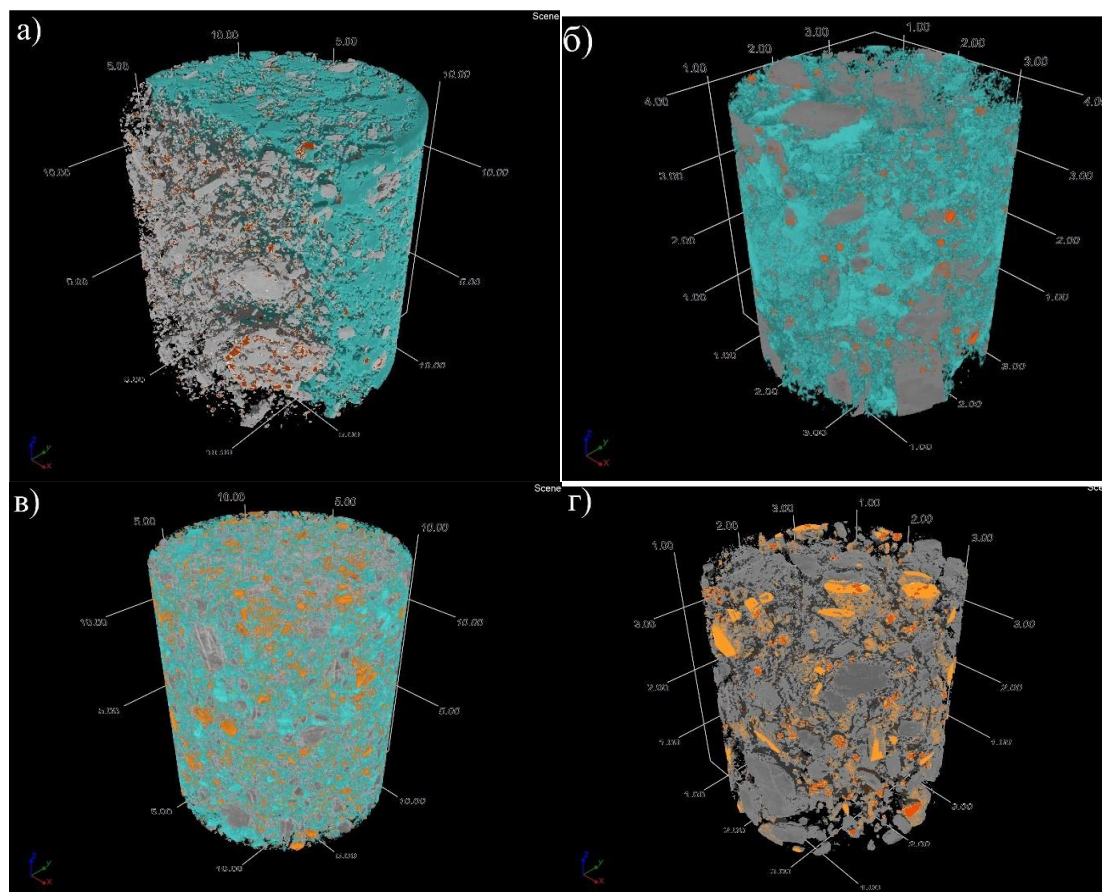


Рис. 8. 3D модель по данным КТ четырех крупнообломочных разностей. Обозначения: поровое пространство – синим, плагиоклазы – серым, роговая обманка – оранжевым, рудные минералы – красным

Физические и физико-механические свойства селевых отложений

Плотность крупнообломочных включений варьирует в широких пределах – от 0,79 до 1,78 г/см³, что соответствует грунтам средней и низкой плотности (по ГОСТ 25100–2020). Минеральная плотность изменяется от 2,65 до 2,72 г/см³, что соответствует плотности породообразующих минералов: преобладают плагиоклазы с плотностью 2,55–2,65 г/см³. При этом, роговая обманка с плотностью 3,0–3,4 г/см³ повышает общую плотность твёрдых частиц образца, а рентгеноаморфное вещество (по-видимому, вулканическое стекло), напротив, снижает. Пористость крупнообломочных разностей варьирует от 33–36% до 69–71%, что характеризует их как сильнопористые ($n > 30\%$) (в соответствии с ГОСТ 25100–2020). Открытая пористость существенно ниже – колеблется в пределах 20–37%. Стоит отметить, что в трёх разностях в общую пористость больший вклад вносит открытая пористость, а в одном образце сообщающиеся поры составляют примерно 1/3 от общего объёма пор. Это связано с особенностями микростроения, которые хорошо видны в шлифе: большое количество микропор в общей массе вулканического стекла. Водопоглощение для различных разностей сильно отличается: от 11–12% до 45–47%, что связано с различным соотношением открытых (сообщающихся) и закрытых пор.

Оценка прочности на одноосное сжатие позволила отнести три крупнообломочных разности к полускальным грунтам низкой прочности (1,5–2,6 МПа), а один – к скальным малопрочным грунтам (7,5 МПа). Характер разрушения при проведении испытаний на одноосное сжатие образцов первой группы отличается от характера разрушения образцов второй группы. Первые разрушаются в основном по наклонной плоскости, наблюдаются неразвитые трещины по конусу. Вторые –



разрушаются по сложным наклонным плоскостям, образуется огромное количество микротрещин сложной ориентировки, образец крошится, что в большей степени соответствует хрупко-пластичному разрушению.

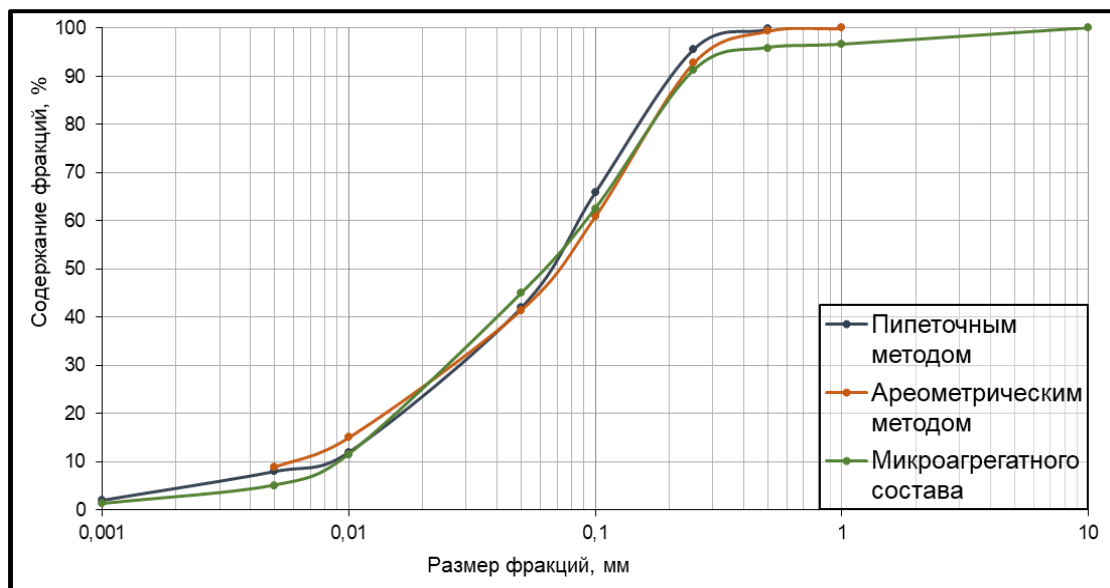


Рис. 9. Интегральные кривые гранулометрического состава дисперсного матрикса селевых отложений

Заключение

Изучение инженерно-геологических характеристик отложений селевых потоков проводилось на основе пробы, отобранной на юго-западном склоне влк. Шивелуч на Камчатке, которая включала дисперсный заполнитель и четыре образца крупнообломочных включений галечно-валунной размерности.

В минеральном составе дисперсного матрикса преобладают плагиоклазы (76%) и рентгеноаморфное вещество (13%), остальная часть представлена роговой обманкой (5%) и КППШ (6%). Особо следует отметить отсутствие глинистых минералов. По гранулометрическому составу дисперсный матрикс относится к супеси, в которой преобладают частицы мелко- и тонкозернистой песчаной и крупнопылеватой фракций. Минеральная плотность дисперсных отложений составляет $2,70 \text{ г/см}^3$, что соответствует андезитовому составу.

Главным породообразующим минералом крупнообломочных включений является плагиоклаз (29–70%), причем чем выше его содержание в породе, тем меньше в ней содержится рентгеноаморфного вещества (по-видимому, вулканического стекла), хотя его содержание высокое (18–59%). Помимо плагиоклаза в породе присутствуют роговая обманка (8–11%) и КППШ (1–5%). По минеральному составу крупнообломочные включения можно отнести к андезитам, что подтверждается их минеральной плотностью ($2,65\text{--}2,72 \text{ г/см}^3$).

По данным КТ удалось наглядно представить микростроение образцов и выявить зоны с повышенной пористостью. Согласно инженерно-геологическим классификациям исследуемые включения относятся к грунтам средней и низкой плотности (плотность $0,79\text{--}1,78 \text{ г/см}^3$), высокой пористости (35–70%). По прочности на одноосное сжатие грунты относятся к полускальным грунтам низкой прочности (1,5–2,6 МПа) и скальным малопрочным грунтам (7,5 МПа).

Поскольку исследованные отложения одного селевого потока, отобранные в одной точке, имеют широкий разброс инженерно-геологических характеристик, можно говорить о большом разнообразии вовлечённого в селевой процесс дисперсного и крупнообломочного материала. По-видимому, основным источником материала



являются отложения пирокластических потоков. Для уточнения условий образования и механизма движения селевых потоков, решения прогнозных задач с целью рекомендации противоселевых мероприятий, требуются дополнительные исследования как селевых отложений в других локациях, так и селеобразующих отложений пирокластических потоков.

Список литературы

- Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др. Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 283–291.
- Горбач Н.В., Портнягин М.В. Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч (Камчатка) // Петрология. 2011. – Т. 19, № 2. – С. 140–172.
- ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2020. – 41 с.
- Маневич Т.М. Ледники вулкана Шивелуч // Материалы XXVII конференции, посвященной Дню вулканолога. – Петропавловск-Камчатский, 2024. – С. 303–305.
- Сейнова И.Б., Черноморец С.С., Тутубалина О.В., Баринов А.Ю., Соколов И.А. Условия формирования селевых потоков в районах активного вулканизма (на примере вулканов Ключевской и Шивелуч, Камчатка). Часть 2 // Криосфера Земли. – 2010. – Т. XIV, № 3. – С. 29–36.
- Слядnev Б.И., Литвинов А.Ф. Объяснительная записка к государственной геологической карте масштаба 1:200000. Серия Восточно-Камчатская, лист N-57-XXXVI. – М.: Мингео СССР, 1989. – 86 с.