

DOI 10.53278/2306-9139-2023-2-21-36-43

УДК 624.131.43

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОРОД КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАЙОНАХ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ДУГИ

HYDROTHERMAL ALTERATION OF ROCKS AS A FACTOR OF LANDSLIDE DEVELOPMENT IN GEOTHERMAL AREAS OF THE KURIL-KAMCHATKA VOLCANIC ARC

Ю.В. Фролова¹, О.В. Зеркаль², И.Е. Большаков³
J.V. Frolova, O.V. Zerkal, I.E. Bolshakov

*Геологический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,
Ленинские горы, д. 1, Москва, 119234, Россия*
Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, 119234 Moscow, Russia

ju_frolova@mail.ru¹, igzov@mail.ru², bolshakov.ilya.210@yandex.ru³

Аннотация. В статье рассматриваются особенности формирования оползней в геотермальных районах Курило-Камчатской вулканической дуги. Наиболее распространены мелко-среднемасштабные оползни скольжения и течения; гораздо реже происходят крупномасштабные комплексные оползни, однако именно они оказывают наиболее значительное воздействие на геологическую среду. Сделано заключение, что одним из первостепенных факторов развития оползней в регионах с высокой вулканической активностью является гидротермальная переработка пород, слагающих склоновый массив. В наибольшей степени на устойчивость склона влияет гидротермальная аргиллизация, которая, развиваясь на отдельных участках массива, вызывает снижение прочности пород на 2–3 порядка.

Abstract: The article discusses the landslides formation in geothermal areas of the Kuril-Kamchatka volcanic arc. The most common are small- to medium-size slides and earthflow; large-scale complex landslides occur much less frequently, but they have the most significant impact on the geological environment. It was concluded that one of the primary factors in the landslides development is hydrothermal alteration of rocks composing the slope massif. Hydrothermal argillization affects the stability of the slope to the greatest extent, since, developing in certain areas of the massif, it causes a decrease in the strength of rocks by 2–3 orders of magnitude.

Ключевые слова: оползни, геотермальный район, гидротермальная аргиллизация, физико-механические свойства, прочность, Курило-Камчатская вулканическая дуга.

Keywords: landslides, geothermal region, hydrothermal argillization, physical-mechanical properties, strength, Kuril-Kamchatka volcanic arc.

Введение

На Земле существует ряд регионов, в пределах которых проявлено максимальное разнообразие геологических процессов, в том числе, и катастрофических. В России таким регионом является Курило-Камчатская вулканическая дуга, для которой характерны высокая сейсмическая активность, вулканические извержения, цунами, геотермальная деятельность, а также масштабные экзогенные процессы — гравитационные, эрозионные и иные. Некоторые проявления этих процессов представляют серьезную опасность для территорий, перспективных с точки зрения социально-экономического развития региона.

В настоящее время заметно возрос интерес к геотермальным районам, что обусловлено, во-первых, мировой потребностью в использовании нетрадиционных видов энергетических и тепловых ресурсов, соответственно, развитием геотермальной энергетики, а во-вторых, развитием туризма. На территории Камчатки и Курильских островов разведаны десятки геотермальных месторождений, построено несколько тепловых и электрических станций, функционируют рекреационные зоны и тепличные хозяйства, проложены туристические маршруты. Следует упомянуть, что с 2014 г. в стране реализуется «Комплексная государствен-

ная программа по социально-экономическому развитию Дальневосточного федерального округа». При инженерно-хозяйственном и туристическом освоении геотермальных районов требуется целый комплекс мероприятий, прежде всего необходима оценка инженерно-геологических условий соответствующих территорий, в том числе, оценка опасности от возникающих геологических процессов.

Геотермальные площади представляют собой геодинамически активные объекты, на которых постоянно происходят изменения инженерно-геологических условий: меняется рельеф, активизируются обвально-оползневые и эрозионные процессы, наблюдаются деформации поверхности, миграция термопроявлений, гидротермальные взрывы, изменение напряженно-деформированного состояния и иные [14]. Это отмечается многими специалистами для различных геотермальных районов не только Курило-Камчатского региона, а также Италии, Исландии, Филиппин, Индонезии, Японии, США, Мексики, Новой Зеландии и многих других стран — потребителей геотермальной энергии. Данные процессы происходят как в ходе естественной эволюции гидротермальных систем, так и вследствие техногенных факторов, возникающих при освоении и эксплуатации геотермальных месторождений.

Среди происходящих на геотермальных площадях процессов наиболее масштабное воздействие на геологическую среду оказывают оползни. Известно немало случаев, когда оползни наносили экономический ущерб, нарушая работу эксплуатационных и реинжекционных скважин, повреждая сооружения геотермальных станций, и даже приводили к человеческим жертвам. Вопросам их формирования и развития посвящены многочисленные работы по термальным полям Филиппин [17], Индонезии [9, 16, 20], Италии [10], США [18], а также Камчатского полуострова [1–3, 5, 11, 15, 19].

Цель данной работы — исследовать оползни, формирующиеся в геотермальных районах Курило-Камчатского региона, выявить их основные типы и механизмы смещения, а также установить специфические особенности, связанные с гидротермальной деятельностью.

Краткий обзор оползней в геотермальных районах

Одним из первых на проблему влияния современной гидротермальной активности на развитие оползневых процессов обратил внимание Н. Б. Кроу, изучая гейзеры района озера Клир (штат Калифорния, США) [8].

Большое внимание оползневым процессам в вулканических районах уделял в своих рабо-

тах Б.Войт [19]. Он выделил в отдельную группу склоновые процессы, происходящие в геотермальных районах, и указал, что среди них могут быть оползни как малого и среднего масштаба, так и гигантские катастрофические. Среди факторов формирования оползней особо подчеркивается роль гидротермальной переработки пород, в том числе, наличие слабых глинистых прослоев, гидратация глинистых минералов, выщелачивание первичных минералов и растворение цемента и пр., что значительно ослабляет присклоновые участки массивов и приводит к их обрушению.

Началу изучения катастрофических проявлений склоновых процессов в районах эксплуатации геотермальных ресурсов в большой степени поспособствовал оползень объемом более 800 тыс. м³, произошедший в 1991 г. на геотермальном месторождении Зунил I в западной Гватемале, обеспечивавшим работу электростанции мощностью 10,8 МВт [12; 19]. Обрушение склона привело к гибели 23 человек и разрушению нескольких ферм.

Проблема развития оползневых процессов в геотермальных районах остро стоит на Филиппинах. Здесь оползни неоднократно повреждали здания геотермальных электростанций, дороги, трубопроводы, линии электропередач, в связи с чем специалисты «Корпорации по развитию энергетики» исследуют специфику формирования оползней и проводят оценку опасности обрушения склонов [17]. На основании результатов исследований был сделан вывод, что помимо «классических» факторов, приводящих к обрушению склонов, не менее важным фактором является присутствие в геологическом разрезе измененных вулканогенных пород и гидротермальных глинистых отложений, а также — наличие на склоне термопроявлений в виде парогазовых струй и грязевых котлов. Филиппинскими специалистами осуществляется мониторинг за состоянием склонов, разработана специальная методика оценки оползневой опасности и комплекс защитных инженерных мероприятий по снижению воздействия оползней окружающую среду и инженерную инфраструктуру.

Многочисленные оползни характерны для термальных полей Индонезии, где они регулярно наносят экономический ущерб. Наглядным примером недоучета влияния активных гидротермальных процессов, сопровождавшихся катастрофическими последствиями, является прорыв высокотемпературных ($T=80-90^{\circ}\text{C}$) грязевых масс в Поронге (Восточная Ява) в 2006 г., спровоцированный бурением эксплуатационной скважины. Прорыв грязевых масс привел к разрушению на прилегающих территориях более 10 тыс. домов в 12 населенных пунктах.

В 2013 г. в геотермальном районе Камоянг (Западная Ява) произошел оползень объемом 33 тыс. м³, нарушивший работу реинжекционной скважины. Оползень сформировался в аргиллизированных андезитах; по характеру движения он являлся комплексным: сформировавшись как оползень скольжения, по мере движения оползневых масс, сопровождавшегося фрагментацией и дроблением обломочного материала, он трансформировался в оползень-поток, причем поверхность скольжения оказалась приурочена к горизонту гидротермальных глинистых грунтов [20]. Всего за последнее время в этом районе зафиксировано 28 оползней, сформированных в гидротермально измененных вулканогенных породах. В настоящее время осуществляется международный проект по выявлению причин обрушений вершинного лавового купола на вулкане Мерапи (о. Ява) [9]. Проведя комплексный мониторинг, ученые установили, что обрушения происходят благодаря скрытой зоне гидротермально измененных пород, для которых характерны высокая пористость и пониженная прочность.

Оползни широко развиты на участках геотермальной активности Италии. Например, многочисленные оползни характерны для вулканического острова Искья. Здесь в течение голоценового времени происходили оползни различных типов и масштабов — от мелких поверхностных до глубоких оползней скольжения и крупных обвалов [10]. Образование оползней исследователи связывают с вулканотектонической активностью региона, а также с интенсивной гидротермальной деятельностью, которая привела к переработке отдельных горизонтов вулканогенных пород и снижению их прочностных и деформационных свойств. В результате, блоки неизмененных вулканитов сползают по подстилающим их интенсивно аргиллизированным туфам либо обрушаются из-за быстрого выветривания последних.

Многими специалистами, изучающими оползни в геотермальных районах, отмечается, что их формирование часто происходит без каких-либо триггеров в виде сейсмических событий или аномального количества атмосферных осадков, а одним из основных факторов является ослабление пород вследствие гидротермальной переработки.

Геологические условия

Камчатский полуостров и Курильские острова находятся на участке перехода «океан — континент» северо-западного сегмента Тихоокеанского «огненного кольца» — одной из самых динамичных зон Земли. Обычно они рассматриваются как единая крупная островодужная система, относящаяся к области кайнозойской складчатости, характеризующаяся нали-

чием таких общих на всем ее протяжении элементов, как сейсмофокальная зона, глубоководный желоб, высокая вулканическая и тектоническая активность. Повышенный конвективный тепловой поток в пределах Курило-Камчатской вулканической дуги связан с ее тектонической позицией над зоной субдукции. В общем случае, геологические, гидрогеологические и геотермические условия региона благоприятны для формирования гидротермальных систем, однако пространственное распределение геотермических условий крайне неоднородно. Преобладающее число гидротермальных систем расположено в пределах Восточного вулканического пояса, включая Южную Камчатку, и на Большой Курильской гряде. Обычно они приурочены к местам пересечения разломов и располагаются группами, образуя геотермальные районы. В локальном плане большинство из них приурочены к вулcano-тектоническим депрессиям или сложнопостроенным вулканическим массивам четвертичного возраста, отличающимся многофазовым вулканизмом и наличием экструзивных тел кислого состава. Вмещающими породами гидротермальных систем являются вулканические и вулканогенно-осадочные образования неоген-четвертичного возраста.

Фактический материал и методика исследования

Исследования проводились на девяти гидротермальных системах, две из которых расположены на Курильских о-вах (вулкана Баранского, о. Итуруп и Северо-Парамуширская, о. Парамушир), семь — на Камчатском полуострове (Паужетская, Камбальные термальные поля, Кошелевская, Мутновская, Больше-Банная, Гейзерная, Семячинская) (рис. 1*). Большая часть работ проводилась совместно с Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (в частности, с лабораторией геотермии). Образцы отбирались из керна скважин (максимальной глубиной до 1600 м), естественных обнажений и шурфов, пройденных на термальных полях. Всего исследовано более 1300 образцов.

Лабораторные исследования включали изучение структурно-минералогических особенностей пород методами оптической и электронной микроскопии (аналитик ст.н.с. М.С. Чернов), рентгеновской дифрактометрии (аналитики с.н.с. В.В. Крупская, ст. преп. В.Л. Косоруков) и определение показателей различных свойств — физических и физико-механических (прочностных и деформационных). Для большей части образцов определялись следующие показатели: плотность, плотность твердых частиц, пористость, величина водопоглощения, скорости распростране-

* Рисунки приведены в конце статьи, после списка литературы

ния упругих волн, динамические модуль упругости и коэффициент Пуассона, прочность на одноосное сжатие и растяжение, коэффициент размягчаемости, сцепление и угол внутреннего трения. Экспериментальные исследования осуществлялись в соответствии с национальными стандартами. Подробная методика определений изложена в работе [6].

Оползневые процессы и явления в геотермальных районах Курило-Камчатской вулканической дуги

Оползневые процессы и их проявления широко распространены в геотермальных районах Курило-Камчатской дуги. Во многом это связано с сильно расчлененным горным рельефом, активной тектоникой и высокой сейсмичностью соответствующих территорий; кроме того, их развитию способствует климатический фактор, поскольку регион относится к категории избыточно увлажненных. Вместе с тем, имеется определенная специфика в особенностях формирования оползней геотермальных регионов. Это обусловлено, во-первых, гидродинамическим эффектом, который оказывают циркулирующие в массиве термальные флюиды, а во-вторых, масштабными преобразованиями пород, сопровождающимися существенным изменением их физико-механических свойств.

Изменение физико-механических свойств пород под действием гидротермальной аргиллизации

С инженерно-геологической точки зрения наиболее опасным процессом является гидротермальная аргиллизация, поскольку развитие глинистых минералов сопровождается значительным разуплотнением пород и резким снижением их прочностных и деформационных свойств [13]. Под «аргиллизацией» понимается метасоматическое замещение исходных пород глинистыми минералами. Считается, что она сопряжена с завершающими этапами развития гидротермального процесса [4]. Обычно аргиллизиты формируются в условиях малых глубин и низких температур ($T=50-150^{\circ}\text{C}$). В зависимости от условий формирования вторичных минералов выделяют несколько фаций аргиллизитов: цеолит-сметитовую, сметитовую, каолинит-сметитовую, каолинитовую, опал-каолинитовую, алуинитовую, моноопалитовую. Аргиллизация может захватывать большие объемы пород, распространяясь на глубину до нескольких сотен метров, однако наиболее интенсивные преобразования происходят в пределах современных термальных полей, в местах разгрузки гидротерм на поверхности.

Процесс аргиллизации вулканогенных пород был исследован на термальных полях Кошелев-

ского вулканического массива, Камбального хребта, Паужетской, Мутновской, Больше-Банной, Гейзерной гидротермальных систем, вулкана Баранского. Вследствие высокой динамичности и изменчивости протекающих процессов, прочные вулканические массивы трансформируются в пространственно-неоднородные толщи гигроскопичных, пластичных, повышено-сжимаемых, в некоторых случаях набухающих глинистых грунтов, для которых характерны сильная изменчивость минерального состава даже в пределах небольших объемов пород, большое количество кремнистых минералов, «пропитывающих» глину, включения неразложившихся реликтов исходных пород, что в конечном итоге отражается на их свойствах.

На макроуровне аргиллизация начинается по зонам трещиноватости в массиве вулканитов, являющихся наиболее проницаемыми для флюидов (рис. 2). С поверхности стенки трещин быстро перерабатываются и покрываются глинистыми пленками. Постепенно трещины расширяются, появляются новые, и аргиллизация захватывает все большие участки, проникая вглубь массива. В конечном итоге, глинистая масса практически полностью «съедает» вулканический массив, в котором остаются лишь отдельные реликты исходных пород. Толща гидротермальных глин отличается сильной неоднородностью, поскольку она содержит не полностью переработанные фрагменты исходных пород, и характеризуется унаследованной псевдоморфной структурой.

Если перейти на микроуровень, то можно видеть, как изменяются компоненты пород (рис. 2). Преобразования начинаются с вулканического стекла как самого термодинамически неустойчивого компонента вулканогенных пород. На микрофотографиях РЭМ видно, как изначально гладкая поверхность вулканического стекла становится чешуйчатой, вследствие развития глинистых минералов. Постепенно процесс аргиллизации распространяется на весь объем, и плотное вулканическое стекло превращается в пористые смектиты с ячеистым микростроением, вероятно в ассоциации с минералами кремнезема. Микролиты также претерпевают преобразования. В неизмененных эффузивах они имеют правильную идиоморфную форму с четкими очертаниями. При аргиллизации меняется их морфология, острые углы кристаллов сглаживаются, они приобретают ксеноморфные очертания, поверхность становится неровной, «изъеденной». В результате гидротермальных преобразований основная масса эффузивов, первоначально состоящая из вулканического стекла и микролитов, постепенно преобразуется в смектит-кремнеземистое вещество. Изменение фенокристаллов начинается по трещинам спайности

и иным микротрещинам, включениям вулканического стекла, а также прочим дефектам в структуре кристалла, постепенно распространяясь на весь его объем в виде псевдоморфоз.

При аргиллизации одновременно с минеральными преобразованиями происходит растрескивание пород. Этому могут способствовать термические напряжения, возникающие при нагревании пород, чередование избыточного увлажнения и относительного высыхания, а также расклинивающее давление, оказываемое формирующимися глинистыми минералами (возможно, давление набухания минералов смектитовой группы). С увеличением степени аргиллизации интенсивность трещиноватости возрастает и массив постепенно распадается на отдельные блоки, фрагменты и обломки.

Структурно-минералогические преобразования сопровождаются разуплотнением пород, увеличением пористости и резким снижением прочностных и деформационных свойств (рис. 2). В процессе гидротермальной аргиллизации вулканогенных пород (андезибазальтов, андезитов, андезидацитов) снижается плотность воздушно-сухого грунта ρ_d ср: неизменные 2,66 г/см³ → слабоизмененные 2,56 г/см³ → среднеизмененные 2,32 г/см³ → сильноизмененные 2,02 г/см³ → глины 0,57–1,36 г/см³ и увеличивается пористость $n_{ср}$: 5% → 6% → 15% → 25% → 41–79%. Закономерно, что разуплотнение породы, повышение пористости и формирование глинистых минералов существенно влияют на показатели прочностных и деформационных свойств. Модуль упругости уменьшается в 3–4 раза — от 45,3–64,8 ГПа (неизменные и слабоизмененные вулканыты) до 10,5–21,7 ГПа (сильноизмененные вулканыты); прочность на одноосное сжатие снижается в среднем в 7 раз, а при трансформации в глины — на три порядка. Показатели прочностных свойств коррелируют с содержанием глинистых минералов, причем данная зависимость проявлена в большей степени для прочности на разрыв и сцепления и в меньшей степени для прочности на одноосное сжатие. Так, на Нижне-Кошелевском термальном поле с увеличением количества глинистых минералов от 2–3% до 30–35% прочность на разрыв андезитов снижается от 19–24 до 4–6 МПа (коэффициент корреляции $r=-0,96$), а сцепление — от 30–32 до 5–10 МПа ($r=-0,93$). При трансформации вулканогенных пород в глины сцепление уменьшается на два-три порядка, угол внутреннего трения в 2–3 раза.

Таким образом, гидротермальная аргиллизация сопровождается разуплотнением, формированием вторичной пористости и трещиноватости, а также резким снижением прочностных и деформационных свойств, вплоть до превращения прочных массивов

вулканических пород в специфические сильно аргиллизированные или глинистые толщи. Это является одной из главных причин перераспределения напряжений в склоновом массиве, что в конечном итоге приводит к потере его устойчивости и способствует активизации оползневых процессов.

Типы оползней

Многолетние полевые работы в геотермальных районах показали, что оползни различных типов и масштабов происходят практически на всех термальных полях и прилегающих территориях, приуроченных к склонам вулканических массивов или бортам речных долин, сложенных гидротермально измененными породами. Среди них наиболее часто встречаются мелко-среднемасштабные оползни — скольжения и течения, гораздо реже происходят крупномасштабные склоновые смещения со сложным механизмом.

Крупномасштабные оползни имеют наибольшую известность и оказывают значительное воздействие на геологическую среду. Ярким примером является оползень в Долине Гейзеров, произошедший в 2007 г. (рис. 3). Его объем составил порядка 20 млн м³ [21]. Оползень перекрыл реку Гейзерную, образовав завальную плотину и подпрудное озеро, разрушил или изменил режим ряда гейзеров, разрушил вертолетные площадки и хозяйственные постройки и только по счастливой случайности не привел к человеческим жертвам. Его изучению посвящен ряд работ [1–2, 5, 15], в том числе и авторов [11, 21]. Установлено, что помимо «классических» причин, способствующих возникновению оползня, дополнительным важным фактором явилась интенсивная гидротермальная аргиллизация пород, слагающих склон, что вызвало резкое снижение прочностных свойств, вплоть до формирования в массиве отдельных горизонтов и линз гидротермальных глин [7, 11, 13]. Детальное изучение разреза в стенке оползневого цирка показало, что толща сложена высокопористыми пемзовыми и витрокластическими туфами верхнего неоплейстоцена, причем в верхней части они не несут следов изменения, а нижняя часть вмещает термальные воды и поэтому в значительной степени аргиллизирована и цеолитизирована. В зонах разломов, отличающихся интенсивной трещиноватостью и брекчированностью пород и, соответственно, повышенной проницаемостью для термальных растворов, туфы полностью трансформируются в гидротермальные глины. Так, в распадах, пересекающих стенку отрыва, и вероятно, приуроченных к зонам разломов, наблюдаются линзы и прослои гидротермальных глин, заключенные в туфогенную толщу (рис. 4). Превращение

туфов в глины вызывает закономерное разуплотнение и разупрочнение: удельное сцепление снижается на один-два порядка (туфы: $C_{\text{ср}}=2,06$ МПа (сухие), 0,73 МПа (водонасыщенные); глины: $C_{\text{ср}}=0,02$ МПа), угол внутреннего трения уменьшается в 2–3 раза (туфы: $\varphi_{\text{ср}}=45^\circ$; глины: $\varphi_{\text{ср}}=19^\circ$) [7]. Таким образом, горизонты аргиллизированных вулканитов и новообразованных гидротермальных глин представляют собой наиболее ослабленные участки массива, и с учетом падения слоев в направлении склона можно предположить, что именно в этих горизонтах сформировалась поверхность скольжения. По-видимому, начальная фаза деформаций заключалась в переходе части водонасыщенных аргиллизированных туфов, залегавших на глубинах около 50–70 м, в вязкопластичное состояние с последующим отчленением и смещением крупного блока склонового массива.

Другое крупное обрушение произошло в 2014 г. в левом борту реки, выше по течению от основного участка с гейзерами (рис. 5). При обрушении склона образовалась каменная лавина ($L \sim 1,5$ км), отложения которой перекрыли русло реки, образовав завальную плотину и подпрудное озеро [21]. Лавина уперлась в противоположный борт и развернулась вдоль русла реки. Она поспособствовала образованию грязекаменного потока, который устремился вниз по течению реки. В отличие от оползня 2007 г., когда обрушились ослабленные аргиллизацией туфы, в этом случае обрушился край лавового потока, сложенный прочными риодацитами ($\rho=2,26$ г/см³; $R_c \sim 50$ МПа, по [11]). Обрушению во многом способствовали трещины в лавовом потоке, ориентированные параллельные склону, которые отмечались на аэрофотоснимках еще в 1970-е годы [3]. Другим, не менее важным фактором, явилась интенсивная гидротермальная деятельность на склоне в виде разгрузки кислых парогазовых струй с температурой более 100°C . В результате в средней и нижней частях склона сформировалась ослабленная зона гидротермально измененных пород. Соответственно, эти породы активно разрушались вследствие эрозивной деятельности реки и ручьев, выветривания, мелкомасштабных гравитационных процессов, что постепенно ослабляло основание всего массива и привело к обрушению его верхней части.

Помимо крупномасштабных событий, в Долине гейзеров постоянно происходят обвально-оползневые процессы меньшего масштаба. Среди них многочисленные мелкие приповерхностные оползни скольжения, формирующиеся по бортам речной долины в гидротермально измененных туфогенных породах и гидротермальных глинах. Помимо гидротермальной переработки их образованию

способствуют полости от каналов и камер гейзеров, которыми пронизан склон. Вдоль оползневого цирка 2007 г. постоянно происходят обвалы и камнепады. На поверхности оползневых отложений 2007 г. возникают вторичные оползни-потоки. По руслу р. Гейзерной и ее притокам нередко проходят грязекаменные потоки. Следует обратить внимание, что ежегодно Долину Гейзеров посещают тысячи туристов. Вместе с тем, это одно из самых опасных мест на Камчатке из-за интенсивного развития оползневых процессов.

Оползни мелкого и среднего масштаба имеют наиболее широкое распространение на термальных полях и окружающих территориях. Преимущественно это приповерхностные оползни, среди которых по механизму смещения выделяются оползни скольжения и оползни течения (рис. 6).

Оползни скольжения (блокового типа) образуются в сильно аргиллизированных вулканитах или плотных гидротермальных глинах, для которых характерно высокое содержание вторичных кремнистых минералов, а также реликтовые остатки первичных минералов, что придают им определенную жесткость. У них обычно хорошо выражены морфологические элементы — стенка отрыва, поперечные трещины и оползневое тело нередко сложного строения.

Оползни течения представляют собой вязкопластические оползни-потоки, которые образуются в результате смещения увлажненных пластичных глинистых грунтов по подстилающему их прочному «скальному основанию», сложенному вулканогенными породами. Мощность оползневых отложений обычно не превышает первых метров. Сценарии их формирования могут быть различны. В одних случаях это медленный процесс с постепенным развитием пластических деформаций, в других — быстрое смещение в результате разжижения водонасыщенных глинистых грунтов, иногда вследствие сейсмического события. Они могут происходить даже на пологих склонах.

По долинам ручьев встречаются отложения долинных (канализированных) оползней-потоков, грязевых и грязекаменных потоков, которые формируются при сильном увлажнении гидротермальных глинистых отложений в результате снеготаяния или обильных атмосферных осадков с последующим их смещением в виде потоков.

Заключение

Обобщив данные по различным геотермальным районам Курило-Камчатского региона, становится очевидным, что при их освоении необходимо учитывать повышенную вероятность возникновения опасных склоновых процессов, связанных с аргиллизацией и ослаблением пород при гидротермаль-

ной переработке, выступающей как один из факторов оползнеобразования.

Наиболее распространены мелко-среднемасштабные оползни скольжения и течения; гораздо реже происходят крупномасштабные оползни со сложным механизмом смещения, однако именно они оказывают наиболее значительное воздействие на геологическую среду.

Сделано заключение, что одним из ведущих факторов развития оползней является гидротермальная переработка пород, слагающих склоновый массив, причем в наибольшей степени на устойчивость склона влияет гидротермальная аргиллизация. Она сопровождается разуплотнением, формированием вторичной пористости и трещиноватости, а также резким снижением прочностных и деформационных свойств, вплоть до превращения прочных массивов вулканических пород в специфические сильно аргиллизированные или глинистые толщи. Это является

одной из главных причин перераспределения напряжений в склоновом массиве, что в конечном итоге приводит к потере его устойчивости и способствует активизации оползневых процессов

Для надежного моделирования и прогноза этих процессов необходимы данные о физико-механических свойствах исходных, гидротермально-измененных и новообразованных пород; информация о пространственной изменчивости свойств в разрезах гидротермальных систем; знания о динамике изменения свойств во времени в ходе гидротермального процесса, поскольку они могут происходить с высокой скоростью.

Кроме того, необходимо отметить тот факт, что оползни активно влияют на пространственное расположение, динамику и режим поверхностных термопроявлений, а в некоторых случаях крупные оползневые тела могут оказывать влияние и на структуру гидротермальной системы в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двигало В. Н., Мелекесцев И. В. Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвальных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине гейзеров (по данным аэрофотограмметрии) // Вулканология и сейсмология, 2009, № 5, С. 24–37.
2. Лебедева Е. В., Балдина Е. А., Медведев А. А. Склоновые процессы в долине р. Гейзерной (Камчатка): результаты дешифрирования разновременных космических снимков высокого пространственного разрешения // ГЕОМОРФОЛОГИЯ, 2022, т. 53, № 4, С. 3–16.
3. Леонов В. Л. Обвал и оползень, произошедшие 4 января 2014 г. в Долине Гейзеров, Камчатка, и их последствия. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2014, № 1, Вып. 23, С. 7–20
4. Метасоматизм и метасоматические породы / Под ред. В. А. Жарикова, В. Л. Русинова. — М.: Научный мир, 1998, 492 с.
5. Пинегина Т. К., Делемень И. Ф., Дроздин В. А., Калачева Е. Г., Чирков С. А., Мелекесцев И. В., Двигало В. Н., Леонов В. Л., Селиверстов Н. И. Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестник ДВО РАН, 2008, № 1, С. 33–45.
6. Фролова, Ю. В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения / Ю. В. Фролова. — М.: КДУ, 2015. — 222 с. — ISBN 978–5–906226–72–3.
7. Фролова Ю. В., Гвоздева И. П., Чернов М. С., Кузнецов Н. П. Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород Долины Гейзеров (полуостров Камчатка) // Инженерная геология, 2015, № 6, С. 30–43.
8. Crow, N. B. An environmental overview of geothermal development: The Geysers- Calistoga KGRA (Known Geothermal Resource Area region) // Environmental geology, 1978, Vol. 4, NTIS Report # UCRL 52496, 72 p.
9. Darmawan H., Troll V. R., Walter T. R., Deegan F. M., Geiger H., Heap M. J., Seraphine N., Harris C., Humaida H., Muller D. Hidden mechanical weaknesses within lava domes provided by buried high-porosity hydrothermal alteration zones // Scientific Reports, 2022, 12:3202, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06765-9>.
10. Della Seta, M., Esposito C., Marmoni G. M., Martino S., Paciello A., Perinelli C., Sottili G. Geological constraints for a conceptual evolutionary model of the slope deformations affecting Mt. Nuovo at Ischia (Italy) // Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 2015, Vol. 2, P. 15–28.
11. Gvozdeva, I. P., Frolova J. V., Zerkal O. V. Slope processes hazards in geothermal areas: a case study of the Geysers Valley, Kamchatka // Proceedings of WGC 2015. — Australia, Melbourne 2015. — <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/12090.pdf>
12. Flynn T., Goff F., Van Eeckhout E., Goff S., Ballinger J., Suyama J. Catastrophic landslide at Zunil I Geothermal Field, Guatemala, January 5, 1991 // Geothermal Resources Council Transactions, 1991, Vol. 15, P. 425–433.

13. Frolova J. V., Ladygin V.M, Rychagov S. N., Zukhubaya D. Z. Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril-Kamchatka island arc // *Engineering Geology*, 2014, Vol. 183, P. 80–95.
14. Frolova J. V., Chernov M. S., Rychagov S.N, Zerkal O. V. The impact of hydrothermal alteration on the geological environment, Kamchatka Peninsula, Far East, Russia // *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, Iceland, April — October 2021.
15. Kiryukhin, A. V., Rychkova, T. V., Dubrovskaya, I. K. Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide // *Applied Geochemistry*, 2012, Vol.27, P.1753–1766. — doi:10.1016/j.apgeochem.2012.02.011
16. Kristianto, B., Gunderson R., Gunawan A. Geological engineering for hazard assessment of Pad AWI-14, Salak Field, West Java, Indonesia // *Proceedings, 13 Indonesia Int. Geothermal Convention & Exhibition — Indonesia*, 2013. — https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/INAGA/2013/ES.05_BudiK_CVX.pdf
17. Pioquinto, W.P.C., Caranto J. A., Bayrante L. F., Zarco M. H., Catane S. G. Mitigating a deep-seated landslide hazard — the case of 105 Mahiao Slide Area, Leyte Geothermal Production Field, Philippines // *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia*, 2010, <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0218.pdf>
18. Reid M. E., Sisson T. W., Brien D. L. Volcano collapse promoted by hydrothermal alteration and edifice shape, Mount Rainier, Washington // *Geological Society of America. Geology*, 2001, Vol. 29 (9), P. 779–782.
19. Voight, B. Causes of landslides: Conventional factors and special considerations for geothermal sites and volcanic regions. *Geothermal Resources Council Transactions*. 1992. Vol.16, P. 529–533
20. Wijaya, P. K., Zangel C., Straka W., Ottner F. (2017) Geological aspects of landslides in volcanic rocks in a geothermal area (Kamojang, Indonesia) // *Proceedings, the 4th World Landslide Forum*. — Ljubljana, Slovenia, 2017. — P.1–8. — DOI: 10.1007/978-3-319-53483-1_51
21. Zerkal O. V., Gvozdeva I. P. Landslide activity and landslide hazard in Geyser Valley (Kamchatka Peninsula, Russia). In book: *Natural hazards and risk research in Russia, Innovation and discovery in Russian science and engineering*. Springer Internat. Publ., 2019. Vol. 1, P. 317–344. DOI: 10.1007/978-3-319-91833-4_23

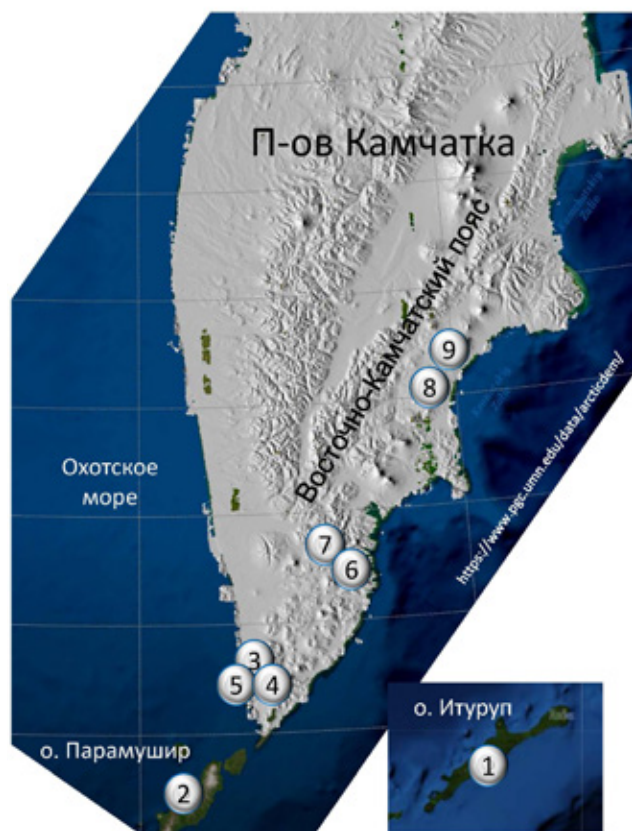


Рис. 1. Схема расположения исследованных гидротермальных систем: 1 — Вулкана Баранского, 2 — Северо-Парамуширская, 3 — Паужетская, 4 — Камбальные термальные поля, 5 — Кошелевская, 6 — Мутновская, 7 — Больше-Банная, 8 — Семячинская, 9 — Гейзерная

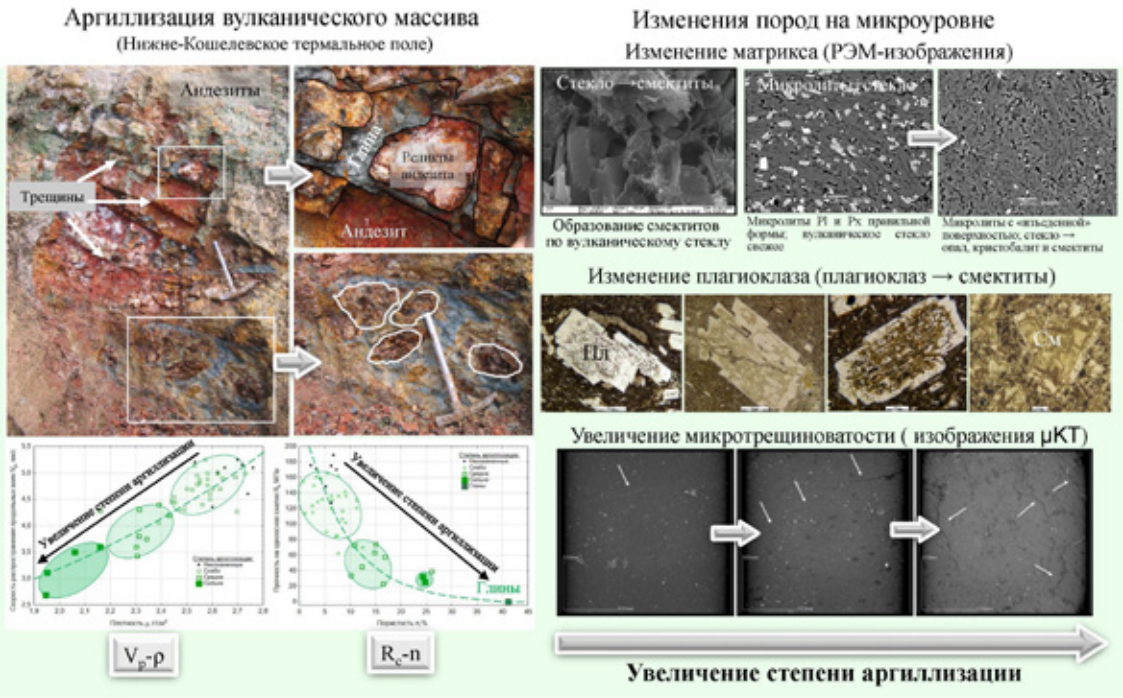


Рис. 2. Структурно-минеральные преобразования и изменения свойств андезитов при гидротермальной аргиллизации

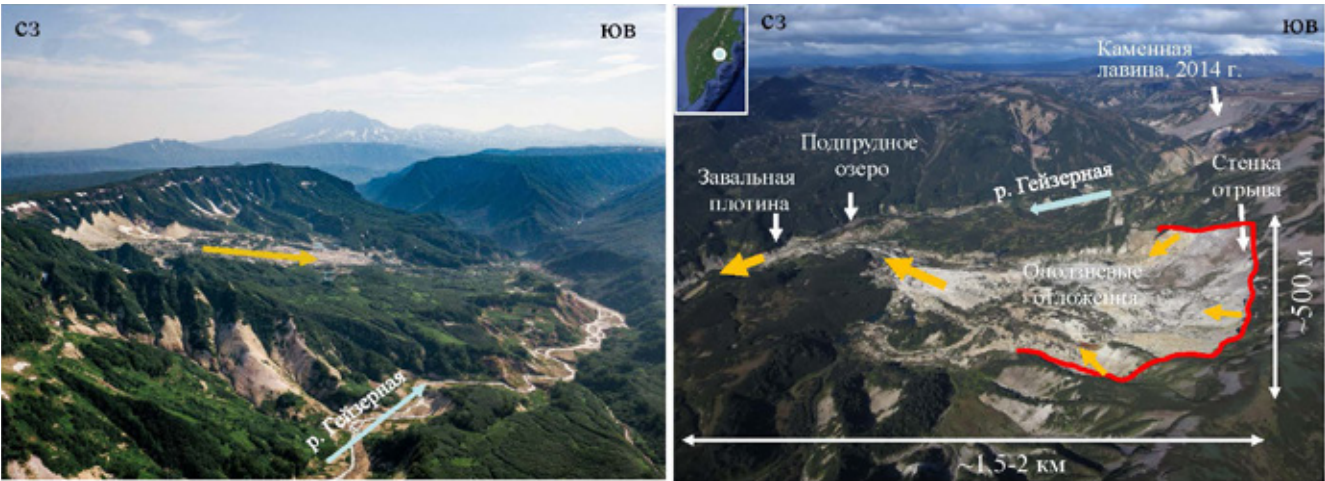


Рис. 3. Оползень в Долине гейзеров 2007 г. (слева фото И. Е. Большакова, 2022 г., справа фото Ю. В. Фроловой, 2016 г.)

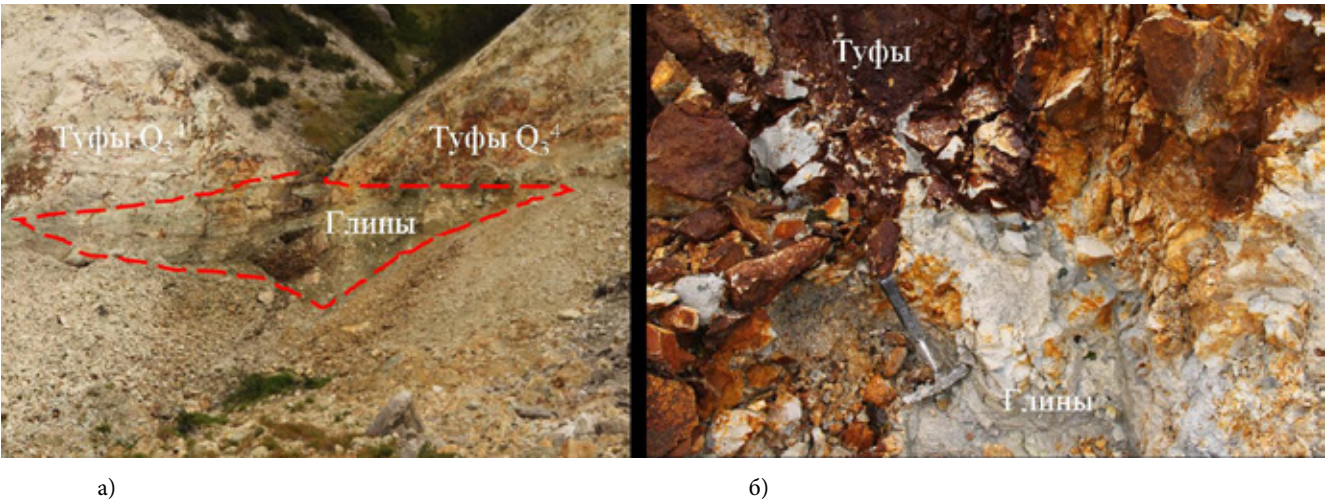


Рис. 4. Фрагмент стенки отрыва оползня 2007 г. в Долине гейзеров. Прослои и линзы гидротермальных глин в туфовой толще (фото Ю. В. Фроловой, 2013 г.): а — общий вид, б — крупный план

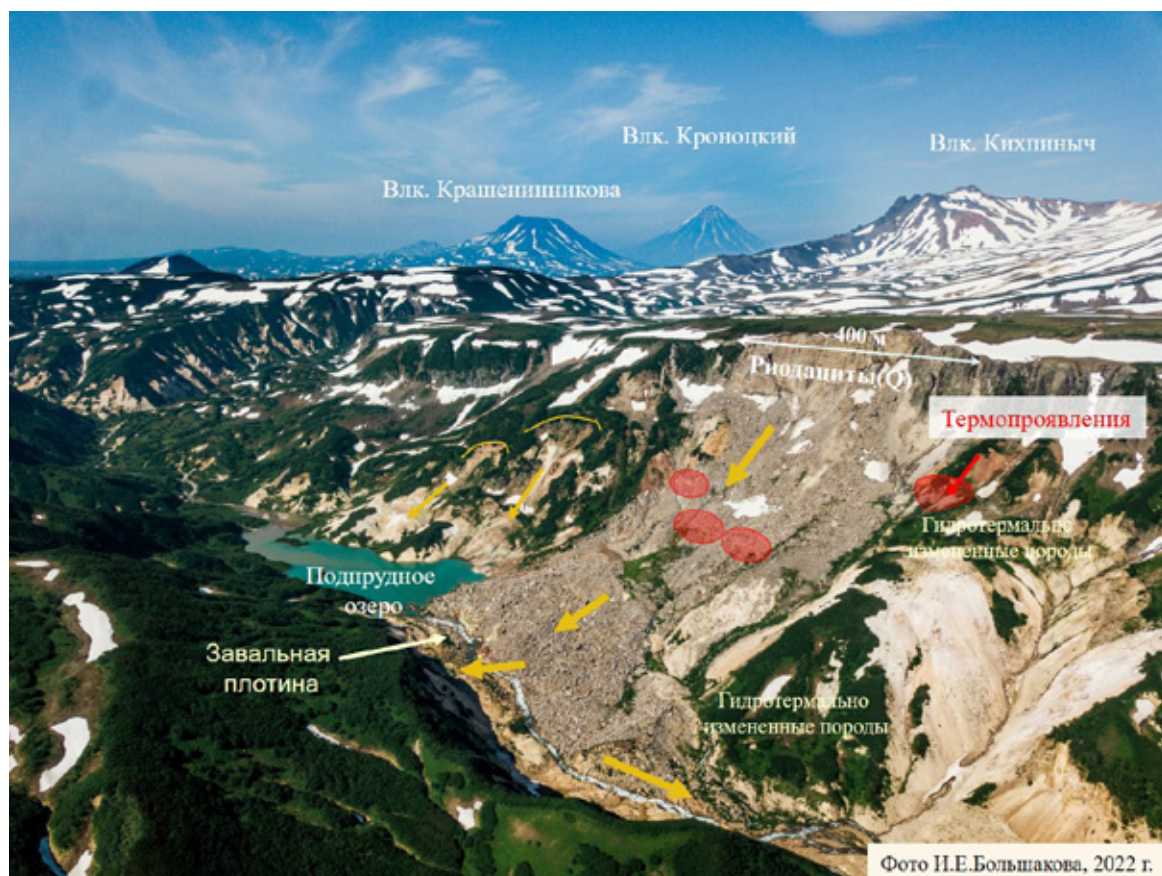


Рис. 5. Оползень в долине р. Гейзерной 2014 г. (фото И. Е. Большакова, 2022 г.)

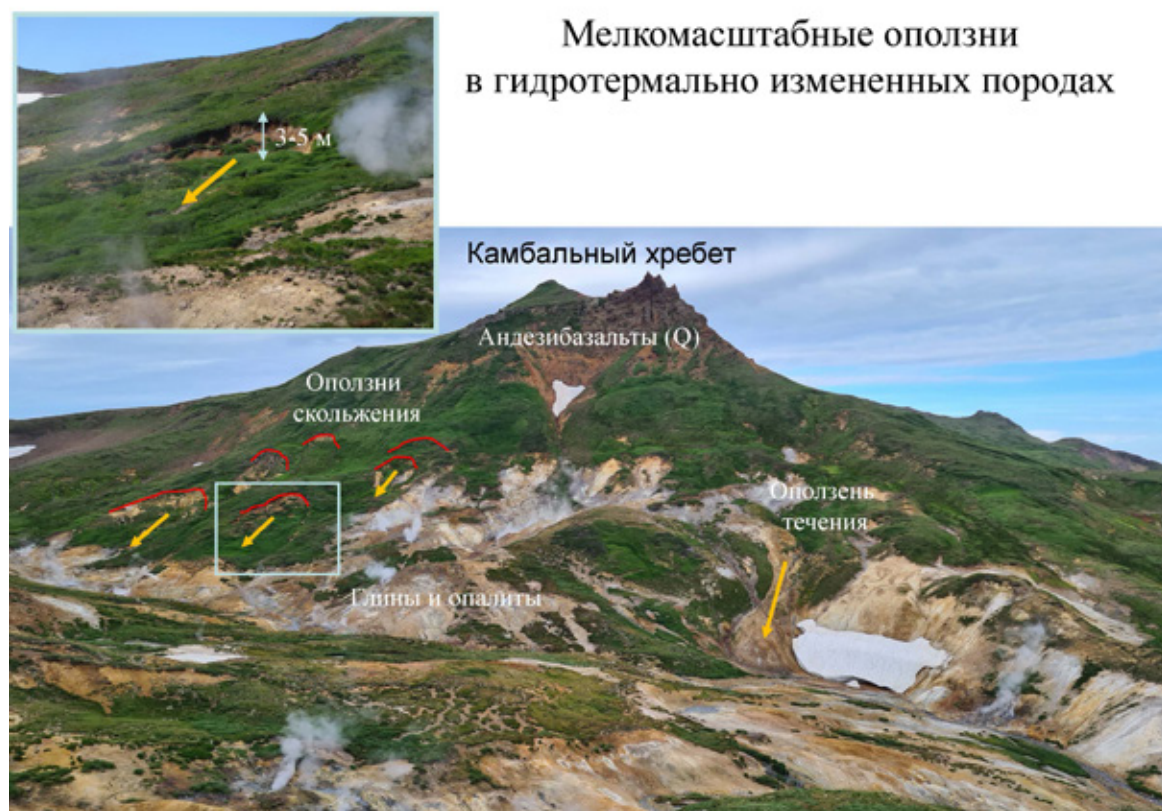


Рис. 6. Мелкомасштабные оползни скольжения и течения на Южно-Камбальном Дальнем термальном поле (фото Ю. В. Фроловой, 2022 г.)