

РАЗДЕЛ V. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА, ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГЕОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМАХ

CHAPTER V. MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER, GEOMECHANICAL PROCESSES AND CHEMICAL INTERACTION IN GEOFLUID SYSTEMS

УДК 624.131.: 551.3

Инженерно-геологические аспекты исследования гидротермальных систем

Ю.В. Фролова, И.Е. Большаков

*МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия
ju_frolova@mail.ru*

При освоении геотермальных районов необходима оценка инженерно-геологических условий соответствующих территорий. Обобщение литературных данных по различным гидротермальным системам мира, а также многолетние исследования, проводимые на геотермальных площадях Камчатки и Курильских островов, показали, что с инженерно-геологической точки зрения эти районы обладают рядом специфических особенностей. Важнейшим геологическим процессом является гидротермальный метасоматоз, изменяющий состав, состояние и физико-механические свойства исходных пород. В свою очередь, это вызывает ряд геологических последствий, в том числе опасных, среди которых изменения рельефа, активизация эрозии, развитие обвально-оползневых процессов, деформации поверхности, миграция и изменение режима теплопроявлений, гидротермальные взрывы, изменение напряженно-деформированного состояния массива и иные. Процессы и явления, возникающие в результате гидротермальной деятельности, как правило, взаимосвязаны между собой, образуя парагенетические ряды, а кроме того, в масштабе геологического времени протекают с высокой скоростью.

Ключевые слова: геотермальные районы, инженерно-геологические условия, опасные геологические процессы, физико-механические свойства, преобразования пород

Engineering-geological aspects of the hydrothermal systems study

Julia V. Frolova, Ilya E. Bolshakov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia

Developing of geothermal areas requires to assess the engineering-geological conditions of the territories. Generalization of literary data on various hydrothermal systems of the world, as well as long-term studies conducted in the geothermal areas of Kamchatka and the Kuril Islands, have shown that from an engineering-geological point of view, these areas have a number of specific features. The most important geological process is hydrothermal metasomatism, which changes the composition, state and physical and mechanical properties of the initial rocks. In turn, this causes a number of geological consequences, including hazardous ones, such as changes in relief, activation of erosion, development of landslides, surface deformations, migration and change in the regime of thermal manifestations, hydrothermal explosions, changes in the stress-strain state of the massif and others. The processes and phenomena that arise as a result of hydrothermal activity are usually interconnected, forming paragenetic series, and in addition, on the scale of geological time, they occur at a high speed.

Keywords: geothermal areas, engineering-geological settings, hazardous geological processes, physical and mechanical properties, rock alteration

Введение

При энергетическом, инженерно-хозяйственном и туристическом освоении геотермальных районов возникает целый комплекс задач и, прежде всего, необходима комплексная оценка инженерно-геологических условий соответствующих территорий. Под инженерно-геологическими условиями (ИГУ) понимаются компоненты геологической среды, влияющие на условия проектирования и строительства инженерных сооружений, а в более широком смысле – на условия освоения территории, в том числе, они определяют, какие могут возникнуть геологические опасности. Обобщение и анализ литературных данных по различным гидротермальным системам (ГТС) мира, а также многолетние исследования, проводимые на геотермальных площадях Камчатки (Паужетская, Гейзерная, Семячинская, Мутновская ГТС, Кошелевские и Камбальные термальные поля) и Курильских островов (Северо-Парамуширская и Баранского ГТС), показали, что с инженерно-геологической точки зрения эти районы обладают целым рядом специфических особенностей.

Специфика инженерно-геологических условий геотермальных районов

Спецификой геотермальных площадей являются масштабные преобразования массивов под действием циркулирующих гидротерм, охватывающие значительные объемы до глубины первых километров. Термальные флюиды разной температуры, химического состава и фазового состояния, воздействуя на вмещающие породы, изменяют их химико-минеральный состав, морфологию порово-трещинного пространства и физико-механические свойства (плотность, прочность, деформационные характеристики). В итоге формируются пространственно-неоднородные толщи, в составе которых представлены породы с очень контрастными свойствами. Это значительно усложняет методику исследования массивов гидротермально-измененных пород, в том числе, оценку их деформируемости и расчеты устойчивости. Среди продуктов гидротермального метасоматоза наиболее часто встречаются вторичные кварциты, пропилиты, кварц-адуляровые метасоматиты, аргиллизиты, опалиты. С инженерно-геологической точки зрения наиболее опасным процессом является гидротермальная аргиллизация, поскольку развитие глинистых минералов по первичным компонентам вулканогенных пород сопровождается разуплотнением, выщелачиванием, трещинообразованием с резким снижением прочностных и деформационных свойств. Аргиллизация может охватывать большие объемы пород до глубины нескольких сотен метров, а также развиваться в зонах разломов, однако наиболее интенсивные преобразования происходят в местах разгрузки парогидротерм на дневной поверхности. На термальных полях прочные вулканические массивы нередко полностью трансформируются в аргиллизиты, для которых характерна сильная изменчивость минерального состава и свойств даже в пределах небольших объемов пород. Например, при сильной аргиллизации андезитов их модуль упругости уменьшается в 3-4 раза, прочность на одноосное сжатие снижается в среднем на порядок. При полной трансформации вулканогенных пород в глины прочность на одноосное сжатие снижается на три порядка. Также значительно уменьшаются сдвиговые характеристики, отвечающие за устойчивость склона: сцепление - на два-три порядка, угол внутреннего трения в 2-3 раза (*Frolova et al., 2014*). В свою очередь, изменение физико-механических свойств пород при гидротермальной переработке влечет за собой ряд геологических последствий, в том числе, и опасных, среди которых локальные изменения рельефа, активизация эрозии, развитие обвально-оползневых процессов, деформации поверхности, миграция и изменение режима термопроявлений, гидротермальные взрывы, изменение напряженно-деформированного состояния массива и иные (*Frolova et al., 2021*).

Процесс рельефообразования в геотермальных районах имеет специфические особенности, что во многом связано с воздействием разгружающихся гидротерм на окружающие их породы. Помимо оказываемого механического воздействия, термальные воды вызывают интенсивную переработку пород, сопровождаемую выщелачиванием, аргиллизацией, снижением прочности, что постепенно приводит к разрушению и выносу

вещества водными потоками. С течением времени происходит образование отрицательных форм рельефа в виде обширных эрозионных котловин, диаметром десятки - сотни метров. Дополнительному увеличению площади котловин способствуют обвально-оползневые процессы, которые происходят по их бортам, сложенным ослабленными гидротермальной деятельностью породами.

Склоновые гравитационные процессы в целом оказывают немалое влияние на формирование и изменение рельефа. Известны масштабные и быстрые изменения рельефа вследствие возникновения крупномасштабных обрушений и оползней. Так, например, случилось в Долине Гейзеров в 2007 и 2014 гг., когда произошли смещения пород, объемом порядка 20 млн. м³ и 3 млн. м³, соответственно (Zerkal, Gvozdeva, 2019). На термальных полях часто формируется характерная бугристая поверхность, которая образуется за счет вязкопластического движения увлажненных гидротермальных глинистых грунтов.

Разница в прочностных свойствах формирующихся гидротермально-метасоматических пород также является одной из причин, приводящих к изменению рельефа. Например, относительно прочные опалиты и вторичные кварциты слагают возвышенные участки (т.н. «опалитовые бугры»), а окружающие их гидротермальные глины, напротив, легко разрушаются, размываются, образуя отрицательные формы рельефа.

Таким образом, на участках поверхностных термопроявлений и прилегающих к ним территориях, наблюдаются специфические формы рельефа (как положительные, так и отрицательные), формирование которых вызвано изменением состава и свойств пород при гидротермальной переработке, а также эрозионными и оползневыми процессами, влияние которых повышается в условиях газогидротермальной активности. Особенностью рельефообразования на геотермальных площадях является высокая скорость, с которой могут происходить изменения геоморфологических структур.

Миграция и изменение режима поверхностных термопроявлений наблюдаются практически на всех изученных ГТС. Это хорошо иллюстрирует тот факт, что площадь распространения гидротермально измененных пород существенно превосходит участки современных термопроявлений. Например, на склонах Мутновского, Кошелевского и Камбального вулканических массивов распространены обширные покровы гидротермально измененных пород, в то время как выходы парогидротерм сконцентрированы лишь на отдельных участках в пределах современных термальных полей. Причины изменения режима и местоположения термопроявлений могут иметь как эндогенную, так и экзогенную природу. Одной из причин является изменение путей фильтрации флюидов сквозь толщу пород в ходе эволюции ГТС. За счет выщелачивания первичных компонентов пород и осаждения вторичных минералов в пустотах происходит структурно-минералогическая перестройка пород и изменение геометрии порового пространства: закрываются старые пути фильтрации и формируются новые каналы, по которым движутся флюиды. Определенную роль также могут играть изменение климатических условий, сейсмические события, оползневые процессы и пр. Дополнительное влияние на режим термопроявлений могут оказывать техногенные факторы. Например, строительство и эксплуатация геотермальных станций в Исландии, Новой Зеландии, США привело к исчезновению многих гейзеров (Атлас., 2016). На Камчатке перед запуском Паужетской ГеоТЭС в 1967 г. среди многочисленных термопроявлений функционировали два гейзера (Паужетские., 1965), однако после начала работы геотермальной станции они исчезли.

Активизация эрозионных процессов

В местах разгрузки термальных вод на поверхности, помимо обычного механического разрушения пород водным потоком, происходит их интенсивная переработка, сопровождаемая разуплотнением и снижением прочности. Это интенсифицирует эрозию, поскольку ослабленные гидротермальной переработкой породы легче разрушаются водными потоками. В результате образуются эрозионные впадины и котловины, диаметром десятки и сотни метров. Такие котловины наблюдаются на Южно-Камбальных, Нижне- и Верхне-

Кошелевских термальных полях, на участке Дачных термопроявлений на Мутновском вулкане, на склонах вулкана Баранского и многих других участках. Эрозионные процессы способствуют механическому выносу большого количества вещества и формированию отрицательных форм рельефа, что многократно усиливается за счет гидротермальной аргиллизации и ослабления вулканогенных пород. Кроме того, ручьи, берущие начало на термальных полях, выносят большое количество вещества в растворенном состоянии. Например, согласно оценке, проведенной для шести наиболее крупных ГТС Курильских островов, ежесуточный гидротермальный вынос составляет 122 тонны хлора и 124 тонны серы (Калачева, Таран, 2017). Происходящий в результате гидротермальных процессов вынос большого объема вещества во взвешенном и растворенном состоянии является одним из рельефообразующих факторов в геотермальных районах, а кроме того, он может снижать устойчивость вулканических построек, приводя к их обрушениям.

Оползневые процессы и явления широко распространены в геотермальных районах. В мировой практике известны случаи, когда они наносили экономический ущерб, нарушая работу скважин, повреждая сооружения геотермальных станций и даже приводили к человеческим жертвам (Voight, 1992). Оползни различных типов и масштабов происходят практически на всех исследованных термальных полях и прилегающих территориях. Наиболее распространены мелко-среднемасштабные неглубокие оползни, среди которых по механизму смещения выделяются оползни течения и оползни скольжения. 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. Оползни скольжения (блокового типа) образуются в сильно аргиллизированных вулканитах или плотных гидротермальных глинах с высоким содержанием кремнистых минералов. Обычно у оползней данного типа хорошо выражены морфологические элементы – оползневой цирк, стенка отрыва и оползневое тело, часто рассеченное поперечными трещинами. Помимо мелко-среднемасштабных оползней, формирующихся в приповерхностных горизонтах, известны случаи крупномасштабных событий, в том числе, оползней сложного механизма и каменных лавин, представляющих опасность при освоении геотермальных районов. Яркими примерами являются оползни, произошедшие в Долине Гейзеров в 2007 и 2014 гг. (Пинегина и др., 2008; Двигало, Мелекесцев, 2009; Zerkal, Gvozdeva, 2019). Установлено, что помимо «классических» причин, способствующих возникновению оползней, дополнительным важным фактором явилась интенсивная гидротермальная деятельность и формирование в склоновом массиве ослабленных зон, сложенных сильноизмененными породами, вплоть до гидротермальных глин.

Гидротермальные взрывы являются достаточно частым явлением в геотермальных районах. Они представляют собой разрушительные события, которые могут привести к повреждению или разрушению зданий геотермальных станций, трубопроводов, скважин и прочей инфраструктуры, и даже к гибели людей. Проявления гидротермальных взрывов в виде глубоких воронок и характерных обломочных отложений и брекчий, зафиксированы и описаны в научной литературе для различных геотермальных районов мира (Rouwet et al., 2014). В пределах Курило-Камчатской дуги в качестве примеров можно привести озеро Кипящее в кальдере Головнина (о-в Кунашир), Голубые озера на ГТС вулкана Баранского (о-в Итуруп), юго-восточное фумарольное поле вулкана Эбеко (о-в Парамушир); следы вероятных взрывов отмечаются на Мутновской, Паужетской и Узон-Гейзерной ГТС и др.

Эндогенные геологические процессы. Поскольку геотермальные районы, как правило, располагаются в геодинамически активных зонах, то при их освоении необходимо учитывать вулканическую активность и сейсмичность. Для Курило-Камчатского региона интенсивность данных процессов достигает наивысшего уровня на Земле. В частности, по интенсивности сейсмичности (согласно шкале MSK-64) Восточная Камчатка с Курильскими островами относится к зоне 10-балльных землетрясений. Сейсмические события, как известно, являются триггерным фактором для развития обвально-оползневых процессов. Что касается вулканизма, то большинство ГТС локализовано на склонах и у подножий вулканических

построек, и хотя большинство из них возникло в плиоцен-плейстоценовое время, некоторые до сих пор находятся в активной стадии. Например, парогазовые и пепловые выбросы регулярно происходят на вулканах Эбеко и Мутновский, а в 2017 г. неожиданно произошло извержение Камбального вулкана.

Заключение

Геотермальные районы обладают целым рядом специфических особенностей, которые необходимо учитывать при освоении соответствующих территорий и оценке ИГУ. Одним из важнейших факторов является гидротермальный метасоматоз, оказывающий влияние на все компоненты ИГУ: состав, строение, состояние и свойства пород; микро- и мезорельеф; гидрогеологические условия (в том числе, режим и местоположение поверхностных термопроявлений); развитие геологических процессов (оползни, эрозия, оседание поверхности, гидротермальные взрывы); НДС массивов и иные. Процессы и явления, возникающие в результате гидротермальной деятельности, как правило, взаимосвязаны между собой и представляют определенную последовательность событий, образуя парагенетические ряды. Важной особенностью геотермальных площадей является высокая скорость происходящих геологических процессов.

Список литературы

1. Атлас долины реки Гейзерной в Кроноцком заповеднике / *А.В. Завадская и др.* М.: КРАСАНД, 2016. 88 с.
2. *Двигало В.Н.* Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвальных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине гейзеров (по данным аэрофотограмметрии) / *В.Н. Двигало, И.В. Мелекесцев* // Вулканология и сейсмология. 2009. № 5. С.24–37.
3. *Калачева Е.Г.* Роль гидротермальных систем Курильской островной дуги в выносе магматических компонентов / *Е.Г. Калачева, Ю.А. Таран* // Материалы XX региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню Вулканолога. Петропавловск-Камчатский. 2017. С. 169–172.
4. Паужетские горячие воды на Камчатке / *Ред. Б.И. Пийп, В.В. Аверьев, С.И. Набоко.* М.: Наука. 1965. 207 с.
5. *Пинегина Т.К.* Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. / *Т.К. Пинегина, И.Ф. Делемень, В.А. Дроздин, Е.Г. Калачева, С.А. Чирков, И.В. Мелекесцев, В.Н. Двигало, В.Л. Леонов, Н.И. Селиверстов* // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. С.33–45.
6. *Frolova J.V.* Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril–Kamchatka island arc / *J.V. Frolova, V.M. Ladygin, S.N. Rychagov, D.Z. Zukhubaya* // Engineering Geology. 2014. Vol. 83. P. 80–95. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.10.011.
7. *Frolova J.V.* The Impact of Hydrothermal Alteration on the Geological Environment, Kamchatka Peninsula, Far East, Russia / *J.V. Frolova, M.S. Chernov, S.N. Rychagov, O.V. Zerkal* // Proceedings World Geothermal Congress 2020+1. Reykjavik, Iceland, April – October 2021.
8. *Rouwet D.* Recognizing and Tracking Volcanic Hazards Related to Non-Magmatic Unrest: a Review / *D. Rouwet, L. Sandri, W. Marzocchi, J. Gottsmann, J. Selva, R. Tonini, P. Papale* // Journal of Applied Volcanology. 2014. Vol. 3(17). P. 1–17.
9. *Voight B.* Causes of landslides: Conventional factors and special considerations for geothermal sites and volcanic regions / *B. Voight* // Geothermal Resources Council Transactions. 1992. Vol. 16. P. 529–533.
10. *Zerkal O.V.* 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 / *O.V. Zerkal, I.P. Gvozdeva.* Springer Int. Publ. AG, Switzerland, 2019. Vol.1. P. 317–344.