инкенерные извостаторование извоскания водинеето Survey Vol. XIV · Том XIV 6/2020

При поддержке:

Саморегулируемая организация



Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве» — Общероссийское отраслевое объединение работодателей





ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

Миронюк С.Г., Кропоткин М.П., Безуглова Е.В.

Основные типы склоновых процессов на шельфе и континентальном склоне
Черного моря в районе п-ова Абрау и оценка их опасности при проведении
инженерно-геологических изысканий

Волошин Д.В., Басько К.С.

О тектонофизической природе пространственной локализации явлений
газогрунтовых выбросов и их связи со структурами центрального типа
на севере Западной Сибири

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модин И.Н., Скобелев А.Д., Валиулина А.М.

Изучение геологического строения Долины Гейзеров и механизма рабо)ты
гейзера Большой по результатам электротомографии (п-ов Камчатка)	

Лексин В.К.

Комплексирование морских инженер	но-геофизических исследований	
в прибрежной части Охотского моря		6

перечень научных специальностей с указанием соответствующих им отраслей науки, которым соответствует основное содержание рецензируемого научного издания:			
05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);	25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (географические науки);		
05.23.19 — Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки);	25.00.28 – Океанология (географические науки);		
	25.00.28 – Океанология (геолого-минералогические науки);		
25.00.03 – Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки);	25.00.28 – Океанология (физико-математические науки);		
25.00.07 – Гидрогеология (геолого-минералогические науки);	25.00.31 – Гляциология и криология Земли (географические науки);		
25.00.08 — Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (географические науки);	25.00.31 – Гляциология и криология Земли (геолого-минералогические науки);		
25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого- минералогические науки);	25.00.32 – Геодезия (технические науки);		
25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (технические науки);	25.00.33 – Картография (географические науки);		
	25.00.33 – Картография (технические науки);		
25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (геолого-минералогические науки);	25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия (технические науки);		
25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых	25.00.35 – Геоинформатика (географические науки);		
(физико-математические науки);	25.00.35 – Геоинформатика (геолого-минералогические науки);		
25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (технические науки);	25.00.35 – Геоинформатика (технические науки);		
25.00.23 — Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов (географические науки);	25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (географические науки);		
	25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (геолого-минералогические науки).		
25.00.23 — Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов (геолого-минералогические науки);			

ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS

Voloshin D.V., Basko K.S.

GEOPHYSICAL STUDIES

Leksin V.K.



https://doi.org/10.25296/1997-8650-2020-14-6-38-54



ИЗУЧЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ДОЛИНЫ ГЕЙЗЕРОВ И МЕХАНИЗМА РАБОТЫ ГЕЙЗЕРА БОЛЬШОЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ (п-ов КАМЧАТКА)

модин и.н.*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, imodin@yandex.ru Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия ООО «НПЦ Геоскан», г. Москва, Россия Адрес: Ленинский пр-кт, д. 95, г. Москва, 119313, Россия

СКОБЕЛЕВ А.Д.

ООО «НПЦ Геоскан», г. Москва, Россия, adskobelev@yandex.ru Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

ВАЛИУЛИНА А.М.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, valiulina1999@yandex.ru

Оригинальная статья Поступила в редакцию 23.11.2020 / Принята к публикации 26.12.2020 / Дата публикации 30.12.2020 © 000 «Геомаркетинг», 2020

Аннотация: в Долине гейзеров (п-ов Камчатка) выполнены электротомографические исследования на участке между плотиной, образованной оползнем 2007 г., и системой гейзеров Витраж. Установлено строение верхней части разреза по тальвегу долины р. Гейзерной до глубины 40 м. Геоэлектрический разрез состоит из трех комплексов слоев, имеющих различное сопротивление. Нижний представлен отложениями крупных оползней голоценового возраста, которые перемещали туфогенные породы кальдерного озера. Выше залегают селевые отложения, образующие фациальную последовательность от грубообломочных пород в верхних частях долины реки до тонкозернистых песков возле оползневой плотины. Сверху грубообломочный материал перекрыт глинистым слоем мощностью от 1 до 2 м, постепенно выпавшим из грязевого селевого потока после его торможения. Самый верхний слой представлен современными аллювиальными отложениями мощностью от 1 до 3 м. На гейзере Большой с помощью электротомографической станции «Омега-48» и двух кос длиной 235 и 47 м выполнен электротомографической станции «Омега-48» и двух кос длиной 235 и 47 м выполнен электрический мониторинг. Первая коса обеспечила глубину исследования 45 м, вторая — около 8 м. Протокол опроса был составлен таким образом, чтобы один цикл измерения проходил для большой косы в течении 10–11 мин, а для малой — 9 мин. Результаты электротомографического мониторинга на гейзере Большой показали, что цикл подготовки, излияния и фонтанирования обусловлен работой двух естественных резервуаров, расположенных примерно друг над другом на глубинах до 5–7 м. Наполнение и опорожнение емкостей происходит в противофазе по отношению друг к другу. При этом нижний бойлер, который авторы назвали Печь, вероятно, обеспечивает напорное избыточное давление, а верхний накапливает воду перед извержением.

Ключевые слова: п-ов Камчатка; Долина гейзеров; гейзер Большой; электрический мониторинг; электрическая томография; механизм фонтанирования

Ссылка для цитирования: Модин И.Н., Скобелев А.Д., Валиулина А.М., 2020. Изучение геологического строения Долины Гейзеров и механизма работы гейзера Большой по результатам электротомографии (п-ов Камчатка). Инженерные изыскания, Том XIV, № 6, с. 38–54, https://doi.org/10.25296/1997-8650-2020-14-6-38-54.

STUDY OF THE VALLEY OF GEYSERS' GEOLOGICAL STRUCTURE AND THE MECHANISM OF THE BOLSHOY GEYSER ACTION BASED ON THE RESULTS OF ELECTRICAL TOMOGRAPHY (KAMCHATKA PENINSULA)

IGOR N. MODIN*

Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; imodin@yandex.ru Address: Bld. 1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia Research and Production Center Geoscan LLC; Moscow, Russia Address: Bld. 95, Leninskiy Ave, 119313, Moscow, Russia

ALEXEY D. SKOBELEV

Research and Production Center Geoscan LLC; Moscow, Russia; adskobelev@yandex.ru Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia

ALINA M. VALIULINA

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; valiulina1999@yandex.ru

Original paper

Received 23 November 2020 / Accepted 26 December 2020 / Published 30 December 2020 © Geomarketing LLC, 2020

Abstract: electrical tomography was performed in the Valley of Geysers between the 2007 landslide dam and the Vitrazh geysers' system. It has been established the structure of the upper part of the section along the Geysernaya River valley talweg to a depth of 40 m. The geoelectric section consists of three complexes with different resistance. The lower complex is represented by deposits of large Holocene landslides, which displaced tuffaceous rocks of the caldera lake. Above there are debris flow deposits, which are located in a facies sequence from coarse-grained rocks in the upper reaches of the river valley to fine-dispersed sands near the landslide dam. At the same time, the top layer of coarse-grained material was covered with a clay layer with a thickness of 1 to 2 m, which gradually fell out of the mudflow. The uppermost layer is represented by modern alluvial deposits with a thickness of 1 to 3 m. Electrical monitoring was carried out at the Bolshoy Geyser by two cables of 235 and 47 m long using the Omega-48 station. The first cable provided a survey depth of 45 m, and the second — about 8 m. The electrode sequence was compiled in such a way that one measurement cycle took place for a large spit for 10–11 min, and for a small one — 9 min. The results of electrotomographic monitoring at the Bolshoy Geyser showed that the cycle of preparation, outpouring, and gushing is due to the action of two natural boilers located approximately above each other at depths up to 5–7 m. Filling and emptying of boilers occurs in the opposite phase with respect to each other. At the same time, the lower boiler (it was named Pech (Oven)) probably provides excess pressure, and the upper one accumulates water before the eruption.

Key words: Kamchatka Peninsula; Valley of Geysers; Bolshoy Geyser; electrical monitoring; electrical tomography; gushing mechanism

For citation: Modin I.N., Skobelev A.D., Valiulina A.M., 2020. Study of the Valley of Geysers' geological structure and the mechanism of the Bolshoy Geyser action based on the results of electrical tomography (Kamchatka Peninsula). Engineering Survey, Vol. XIV, No. 6, pp. 38–54, https://doi.org/10.25296/1997-8650-2020-14-6-38-54.

Введение

Долина Гейзеров, расположенная на п-ове Камчатка, является уникальным местом. Она входит в состав Кроноцкого государственного биосферного заповедника, который находится в Списке всемирного наследия ЮНЕСКО. Одна из характерных особенностей функционирования этой сложной системы поствулканическая активность и действующие гейзеры (термальные источники, которые извергают фонтаны воды с определенной периодичностью) [1].

Ежегодно данный район посещают тысячи туристов. При этом он крайне опасен из-за происходящих там обвально-оползневых процессов. Однако геологическое строение района все еще остается дискуссионным, т.к. бурение там не проводилось из-за существующего риска потери бурового оборудования и возможного травматизма.

Тем не менее гейзеры привлекают внимание геологов и гидрогеологов уже более 200 лет. За это время не сложилось единого мнения о механизмах работы этих уникальных объектов: разными авторами предлагаются различные схемы строения и функционирования [2, 3, 8, 15, 24]. В целом существующие модели удовлетворительно описывают основные внешние проявления гейзеров, но ни одна из них до сих пор не получила общего признания. Кроме этого, необходимо отметить, что попытки объединить имеющиеся модели в ка-

кой-то один общий механизм работы не увенчались успехом и пока не объяснено все известное многообразие гейзеров и особенностей их поведения в силу различий в геологическом строении и конкретной гидрогеологической ситуации в каждом отдельном случае. Наиболее распространенная гипотеза объясняет извержение гейзеров резким критическим падением давления столба жидкости на глубине за счет излияния воды из жерла гейзера и, как следствие, мгновенное выбрасывание огромных водных масс, которые выталкиваются подобно поршню, образуя горячий фонтан [1]. Однако многолетние наблюдения за внешними поверхностными проявлениями гейзеров не привели к де-



Рис. 1. Схема расположения электротомографических профилей (ПР) в Долине гейзеров

Fig. 1. Schematic map of the electrotomographic profiles in the Valley of Geysers

тальному изучению механизма работы этой сложной гидрогеологической системы с помощью конкретных технических и физических измерений. Это связано с целой совокупностью факторов, которые объективно не позволяют достичь намеченной цели. Во-первых, само извержение фонтанирующего гейзера — опасный процесс, который представляет угрозу для жизни людей. Вовторых, проникновение вглубь гейзера — затруднительная задача, т.к. канал, через который поступает вода и пар на поверхность земли, имеет сложную геометрию и в редких случаях удается опуститься на глубину в несколько метров. В-третьих, бурение или какое-то механическое воздействие на толщу вблизи гейзера чрезвычайно опасно и может приводить к авариям. Есть еще одно обстоятельство, которое мешает изучению гейзеров, — любое механическое воздействие на него способно привести к изменению его режима и утрате уникальных фонтанирующих свойств.

Для решения обозначенных проблем авторы предприняли попытку уточнения геологического строения Долины гейзеров. С этой целью в 2020 г. были проведены электротомографические исследования по тальвегу долины р. Гейзерной и электротомографический мониторинг на гейзере Большой. Схема участка показана на рис. 1. Задача заключалась в исследовании механизма действия гейзера Большой и изучении стадий его развития. Электроразведочные исследования на термальных полях

Большинство исследователей, которое работало на геотермальных полях, отмечает высокую гидрогеологическую активность в верхней части разреза на глубине нескольких десятков метров, что проявляется в быстрых изменениях физических свойств природных резервуаров, которые наполняются флюидом, а затем резко опорожняются, заполняясь перегретым паром или воздухом.

Вблизи вулкана Мутновский (южная часть п-ова Камчатка) в 2008 г. проведены исследования методом частотного зондирования [5]. Цель работы состояла в изучении структуры геоэлектрического разреза на глубину до 6,0 м, что позволило определить геометрию подводящих каналов от котлов с термальными водами в пределах Донного поля. Установлено, что низкое сопротивление (0,1-27,0 Ом м) вызвано насыщенностью пород термальными водами, которые в ряде случаев обладают высокой минерализацией. Новосибирские геофизики [5] обнаружили проводящие зоны, вытянутые вверх в виде вертикальных каналов, насыщенных флюидом.

В 2010 г. впервые на геотермальных полях п-ова Камчатки были выполнены электротомографические исследования, которые показали возможности геофизических методов при изучении подобных объектов [9]. По мнению авторов этой работы, представленные данные о взрывах на термальных полях вулкана Эбеко показали, что взрывы не связаны с процессами глубинного магматизма, а имеют гидротермальную природу и обусловлены, прежде всего, изменением уровня грунтовых вод.

Для исследования геотермальных полей вулкана Эбеко была использована электроразведка методом сопротивлений и частотного зондирования [10]. Полученные данные подтверждают наличие неглубоко расположенного гидротермального резервуара в пределах Северо-Восточного поля указанного вулкана.

В 2011 г. турецкие геофизики выполнили мониторинговые исследования на небольшую глубину с помощью метода электротомографии (ЭТ) на геотермальной площадке Балчова [18]. В их работе было показано, что экзогенные процессы оказывают влияние на изменение физических свойств верхней части геологического разреза. По мнению авторов [18], атмосферные осадки и значительные суточные изменения температуры воздуха могут оказывать сильное воздействие на изменение удельного сопротивления пород верхних слоев, расположенных на глубине от 1 до 2 м.

Дополнительно экспериментально исследовалось развитие теплового шлейфа в неглубоком водоносном горизонте [23] и была показана целесообразность применения ЭТ в режиме 4D. Полученные электротомографические изображения геоэлектрического разреза указывают на анизотропные свойства теплового шлейфа, поэтому электротомографический мониторинг может применяться в качестве инструмента регистрации тепловых процессов при управлении нагнетательными скважинами при их эксплуатации.

Общемировая тенденция к использованию возобновляемых источников энергии привела к возрастанию числа исследований в области геотермальной энергетики. В работе [20] изучались возможности метода ЭТ. Исследовалась способность скважинной электротомографической системы контролировать эксперимент по распределению теплового потока в сложнопостроенном водоносном горизонте. Электротомография является инструментом для получения изображений геоэлектрического разреза при контроле закачки горячих растворов в скважины и последующих изменениях их распределения в разрезе [19]. В работе [20] изучались изменения удельного сопротивления, которые помогают проследить эволюцию движения потока нагретой воды в толще породы и оценить температуру жидкости.

Уникальные результаты по глубинному строению кальдеры Узон представлены в работе Ю.Ф. Мороза с соавторами [7]. Исследования проведены с помощью метода магнитотеллурического зондирования ориентировочно до глубины 10 км. Выполнена двумерная инверсия полученных кривых. В результате были построены геоэлектрические разрезы кальдеры по двум ортогональным профилям. Аномалии повышенной электропроводности, выявленные в осадочном чехле и фундаменте, приурочены к выходам на поверхность геотермальных источников. Высокая проводимость аномалий указывает на наличие высокоминерализованных флюидов.

Геологическое строение Долины гейзеров

Долина гейзеров находится в пределах Узонско-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии, которая заполнена вулканогенно-осадочными отложениями четвертичного возраста. Долина представляет собой глубокий каньон р. Гейзерной, где на площади около 6 км² находится 20 крупных гейзеров и несколько сотен выходов термальных вод в виде малых и средних гейзеров, непрерывно фонтанирующих источников горячих вод, горячих и кипящих источников, грязевых котлов, парящих площадок и небольших термальных озер.

Река Гейзерная, протекая по восточному краю Узонско-Гейзерной депрессии, врезается на глубину 700 м, проникая в заполняющие депрессию вулканогенноосадочные отложения, а в среднем и нижнем течении она вскрывает более древние подстилающие породы [1, 2, 11]. Нижняя часть геологического разреза рассматриваемого района сложена вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями. Выделяют три комплекса пород: 1 — докальдерный комплекс (Q₂), состоящий из дацитовых лав и крупнообломочных пемзовых туфов, которые обнажаются в устье р. Гейзерной; 2 — комплекс, соответствующий этапу образования кальдеры (Q₃), в который входят кислые экструзии по бортам долины и покровы игнимбритов, залегающих на водоразделах; 3 — внутрикальдерный комплекс (Q₃⁴), представленный вулканогенно-осадочными отложениями в виде разнообразных туфов мощностью до 600 м.

В гидрогеологическом отношении структура исследуемой гидротермальной системы представляет собой артезианский склон. Считается, что ее тепловое питание осуществляет вулкан Кихпиныч [14]. Подземные воды глубинной



Рис. 2. Типичная электрическая помеха на приемных электродах во время записи сигнала

Fig. 2. Typical electrical noise at the receiving electrodes during signal recording

циркуляции, образующиеся при инфильтрации атмосферных осадков в области этого вулканического массива, нагреваются за счет тепла магматического очага и формируют восходящий поток гидротерм с температурой 250-330°С. Двигаясь к поверхности, они смешиваются с холодными водами и приобретают характер латерального потока с температурой воды около 180°С. Основная его разгрузка происходит в нижнем течении р. Гейзерной. Главные вмещающие породы Гейзерной гидротермальной системы - отложения вулканогенно-осадочной толщи плейстоценового возраста, разделяемой на четыре пачки: устьевую, пемзовую, гейзерную и желтых скал [14].

Каналы современных гейзеров проработаны в отложениях крупных оползней голоценового возраста, которые сошли с левого борта р. Гейзерной. Оползни перемещали плейстоценовые отложения кальдерного озера, представленные слоистыми, слабосцементированными пемзовыми туфами кислого состава [4, 12]. Отложения оползней представлены блоками туфа, достигающими в поперечнике 5 м. Внутри блоков туф сильно перемят и раздроблен до гравийно-песчаной размерности. Первично отложенный материал был рыхлым, но позднее под воздействием температуры и давления был вторично слабосцементирован или превращен в глину под действием термальных вод.

В результате произошедших древних обвалов эрозией обнажается сложная система «вымощенных» гейзеритом палеоканалов и камер древних гейзеров. Некоторые из них представляют собой открытые пустоты, другие заполнены грубым гравием. Каналы и их расширения образованы постепенным выносом мелкообломочного материала оползней восходящими потоками термальных вод, которые постепенно заполняли пустоты между оползневыми блоками, имеющими различную проницаемость. Возникавшее пространство сложной конфигурации между соседними блоками приводило к образованию сильно изогнутых каналов [1].

Методика исследований

Измерения электрического поля проводились с помощью электротомографической станции «Омега-48» (ООО «Логис», г. Раменское Московской области) [6]. При выполнении данных работ использовались две технологии, что обусловлено двумя задачами. Первая связана с изучением строения верхней части Долины гейзеров на глубину до 80 м. Для этого по тальвегу долины реки максимально прямо был пройден профиль длиной 715 м с шагом 5 м. Расположение профиля ЭТ показано на рис. 1 красным цветом. Для достижения максимальной глубинности зондирования и точности геоэлектрического разреза был использован протокол опроса, который включал три установки: две трехэлектродные Amn + mnB, обратную симметричную Шлюмберже *mABn* и дипольную осевую ABmn.

Длина первой косы, которая включала 48 электродов, составляла 235 м. Вследствие обводненности донных осадков речной долины и сравнительно невысоких сопротивлений поверхностных вод (как правило, не более 30-40 Ом м) переходные сопротивления на электродах в подавляющем большинстве случаев не превышали 3 кОм, что обеспечивало хорошее «стекание тока» на питающих электродах АВ до 100-300 мА и нормальный уровень измеряемых сигналов на приемных линиях тл. Тем не менее, низкое фоновое значение удельного электрического сопротивления (УЭС) на уровне 3-5 Ом м приводило к тому, что значительная часть принимаемых сигналов не превышала 1 мВ. Анализ записей поля показал, что значения промышленной помехи составляли от 6 до 40 мкВ/м. Типичная низкочастотная помеха, которая имеет, вероятно, теллурическое происхождение, показана на рис. 2. Ее амплитуда не



Рис. 3. Геоэлектрический (а) и геолого-геофизический (b) разрезы по Долине гейзеров Fig. 3. Geoelectric (a), and geological and geophysical (b) sections along the Valley of Geysers (b)

превышает 0,04 мВ/м, а частотный состав находится в диапазоне от 2,5 до 5,0 Гц. При стандартной электротомографической съемке авторы данной публикации добивались, чтобы не менее 80–90% сигналов имели удовлетворительную точность: не хуже, чем 5–7%.

Вторая задача состояла в выполнении электрического мониторинга на гейзере Большой. В этом случае измерения выполнялись с наибольшей скоростью и максимальной точностью. Высокая скорость съемки требовалась для того, чтобы сложный циклический процесс, который происходит под гейзером, был зафиксирован с максимальной дискретностью. Поэтому, пожертвовав глубинностью измерений, авторы использовали только четырехэлектродные установки Шлюмберже как для большой косы длиной 235 м, так и для малой — 47 м. И в том, и в другом случае удалось сократить время на производство одного снимка до 9 мин. При этом глубинность для длинной косы уменьшилась до 40 м, а для короткой — до 8 м. Таким образом, на гейзере Большом развитие одного цикла несколько раз удалось зафиксировать с помощью семи снимков. Наиболее качественные результаты были получены 47-метровой косой, у которой геометрические коэффициенты наименьшие, а полезные сигналы наибольшие. Это позволило в подавляющем большинстве случаев измерять на mn сигналы более 10–20 мВ. В результате меньше 1% измеряемых сигналов имеют точность хуже 5%. Такие сигналы высокого качества обеспечивают хорошую устойчивость при двумерной инверсии данных, что дает авторам возможность достаточно уверенно анализировать изменения удельного сопротивления самого геоэлектрического разреза.

Строение Долины гейзеров по результатам ЭТ

На рис. 3 представлены геоэлектрический и геолого-геофизический разрезы, полученные авторами в ходе проведенных электротомографических измерений. Данный разрез проходит вдоль Долины гейзеров и суммарно имеет длину 715 м.

Поскольку бурения на данном участке проведено не было, то предположение о строении Долины гейзеров здесь было сделано авторами из общегеологических соображений. В основании разреза на глубинах от 20 до 80 м предположительно залегают породы магматического происхождения. Их удельное сопротивление составляет около 30– 40 Ом·м, что соответствует условиям, когда сильноминерализованная вода в подземных горизонтах имеет сопротивление порядка 0,5 Ом·м.

Наличие интрузивного тела на глубине, зафиксированного на пикетах 100-200, соответствует выступу, который обозначен как скала Пилигрим, и здесь река делает меандр (см. рис. 1). Сверху эти породы перекрываются древними озерными отложениями мощностью до 30-40 м, которые имеют УЭС от 3 до 8 Ом м. Кровля этих отложений показана на разрезе красной пунктирной линией. В 2014 г. по р. Гейзерной сошел сель, зародившийся в верховьях. Поскольку ниже по течению располагалась оползневая плотина 2007 г., то здесь произошло торможение потока в пределах озера, подпруженного оползнем. До 2007 г. высота кратера гейзера над днищем речной долины составляла 11 м [12]. Поэтому мощность отложений селевого потока должна составлять около 10 м. Их подошва на геолого-геофизическом разрезе показана красной штриховой линией (см. рис. 3, b). При этом наблюдается уменьшение удельного сопротивления вниз по течению реки, что может быть объяснено фациальной изменчивостью дисперсной толщи, представленной на расстоянии от источника в следующем порядке: грубообломочный материал пески — тонкие пески — супеси. Эти отложения перекрываются глинистым материалом, который осаждается из воды при остановке потока. В дальнейшем в течение нескольких прошедших лет эти накопления были перекрыты современным аллювием.

Механизм извержения гейзеров

Гейзеры — это кипящие источники с периодическими извержениями воды и пара, сменяющимися интервалами покоя. Классическая последовательность событий при извержении гейзера состоит из трех фаз: медленного истечения воды из верхней части гейзерного канала (грифона) на дневную поверхность (фаза излива), бурного выброса воды с паром (фаза фонтанирования) и последующего выхода пара с постепенно уменьшающейся интенсивностью (фаза парения).

Каждая из стадий функционирования очень важна, т.к. без слаженной работы не будет гейзера как такового. По этой причине иногда возможно прекращение работы гейзера, однако через некоторое время она может возобновиться, но с другим циклом. Цикл — это время, за которое гейзер проходит все стадии своего функционирования. Чаще всего он длится одинаковое количество времени (от нескольких десятков минут до нескольких часов). Существуют гейзеры, внутри которых «бурлит работа», но фонтанное извержение время от времени может не происходить. Так, например, авторы данной статьи в течение месяца (конец июля — начало августа 2020 г.) наблюдали нерегулярность в работе гейзера Шаман в кальдере Узон и гейзера Крепость в Долине гейзеров. Происходит системный сбой в гидрогеологическом режиме, что, вероятно, связано с недостаточным количеством воды или пара для взрывного выталкивания водяного фонтана.

Прямых полевых данных о строении питающих систем гейзеров крайне мало (для небольшого числа гейзеров известно строение только самой верхней части системы), и все существующие модели базируются на двух теоретических принципиально различных типах систем. Первая схема гейзера по А.М. Нечаеву [8] показана на рис. 4, а. Модель Нечаева является вариантом системы, предложенной Г.С. Маккензи в 1811 г. [1], и включает в себя большую подземную полость, соединенную с земной поверхностью каналом в форме перевернутого сифона. Среди специалистов, которые занимаются гейзерами, модель Маккензи считается слишком сложной по морфологии. До настоящего времени не было объяснения тому, как может образоваться так много каналов со сложно изогнутой конфигурацией. По-



Рис. 4. Модели гейзеров систем Маккензи (а) и Бунсена (b), красной стрелкой показано направление движения пара и воды [1]

Fig. 4. Models of geysers' systems Mackenzie (a) and Bunsen (b) [1]. Red arrow shows the direction of steam and water



Рис. 5. Верхняя часть системы гейзеров Гигант (а) и Большой (b) [1]. Обозначения: H_1, H_2 — высоты гейзеров Гигант и Большой соответственно; S_1 и S_2 — площади поперечного сечения гейзеров Гигант и Большой соответственно

Fig. 5. Upper part of the geysers' systems Gigant (a) and Bolshoy (b) [1]. *Designations*: H_1, H_2 — heights of the Gigant and Bolshoy geysers, respectively; S_1 and S_2 — cross-sectional areas of the Gigant and Bolshoy geysers, respectively

этому питающая система Маккензи оказалась практически забытой и в современных моделях гейзеров используется очень редко. Для объяснения периодичности извержений гейзеров были предложены и другие физические модели, например, в работах [3, 13, 16, 25, 27].

Вторая модель питающей системы разработана R.W. Bunsen в 1847 г. [17]. Он предположил, что кипящий источник, имеющий простой вертикальный канал (рис. 4, *b*), при определенных условиях может давать периодические извержения. Для этого канал должен быть узким и длинным, чтобы заполняющая его вода достигала перегретого состояния: высокое гидростатическое давление в нижней части препятствует кипению, а малый диаметр замедляет конвективное перемешивание. В мо-

мент, когда в перегретой воде появляются большие пузыри пара, вытесненная ими вода изливается из верхней части канала, приводя к падению гидростатического давления и нелинейному процессу взрывоподобного вскипания. Поскольку система Бунсена была сравнительно легко проверена с помощью опущенной кинокамеры в гейзер Old Faithful в Йеллоустонском национальном парке (США) [22], то в настоящее время большинство исследователей придерживается именно ее. Сходная модель была обнаружена при сканировании кинокамерой гейзеров Гигант и Большой (рис. 5) [1]. Однако их поперечное сечение значительно превышает сечение вертикальных каналов модели Бунсена. В 2012 г. была опубликована работа,

в которой детально рассматривался ме-

ханизм работы гейзера Old Faithful. Показано, что его вертикальный подводящий канал имеет высоту не менее 42 м, а внизу располагается резервуар, в котором формируется паровой пузырь [26]. Канал заполняется водой в промежутке между извержениями, и вода в основании канала находится под тем же давлением, что и вода в резервуаре. Удаленный источник воды имеет постоянные давление и температуру. Окружающая среда рассматривается как линейная упругая среда, которая деформируется в ответ на изменение давления в резервуаре. Геометрия модели гейзера Old Faithful показана на рис. 6.

Авторы специально подробно остановились на модели системы гейзера Old Faithful как наиболее хорошо изученного с помощью натурных физических измерений объекта подобного типа.

Таким образом, можно видеть, что строение гейзера Old Faithful сильно отличается от строения больших гейзеров исследуемой долины. Размер выводного канала в последнем случае во много раз больше, чем диаметр американского гиганта. Субметровый диаметр не может обеспечить неконвективное движение паровых пузырей к поверхности. Поэтому второй тип работы механизма гейзеров для п-ова Камчатка, по мнению авторов, маловероятен.

Электротомографический мониторинг гейзера Большой

Гейзер Большой — один из самых крупных и доступных для наблюдения гейзеров исследуемой долины. В конце июля — начале августа 2020 г. извержение высотой около 10 м происходило с

периодичностью 63-67 мин, а его длительность составляла 2,5-4,0 мин. Столб пара поднимался на высоту до 200 м. Устье гейзера Большой находится на склоне в полутора метрах выше ровной галечной косы, образовавшейся на месте бывшего подпрудного озера. Извержение этого гейзера длится с максимальной интенсивностью около 3 мин, затем ослабевает и постепенно затухает в течении 20-30 мин, когда вода перестает выплескиваться за пределы грифона. Для изучения гейзера Большой были выполнены параллельно профиль 2 с электротомографической косой длиной 235 м и профиль 3 с косой длиной 47 м. Положение данных профилей показано на рис. 1.

На рис. 7 представлен геоэлектрический разрез по профилю 2 с четырехэлектродной, дипольной и комбинированной трехэлектродной установками. На данном геоэлектрическом разрезе можно выделить 5 слоев.

Кровля нижнего слоя находится на глубине 60 м, его сопротивление по сравнению с вмещающими слоями довольно высокое: от 7,2 до 10,0 Ом·м. Этот слой может быть отнесен к наиболее древним отложениям, слагающим основание разреза. Он стабилен по УЭС, это характерно для очень спокойных условий осадконакопления.

Выше расположен слой, который имеет сопротивления от 3,7 до 7,2 Ом·м, его мощность около 40 м. Снизу вверх наблюдается постепенное увеличение проводимости осадков, по которому можно судить о нарастании глинистости снизу вверх по разрезу от песков к супесям и суглинкам.



Рис. 6. Модель системы гейзера Old Faithful [26]. *Обозначения: d* — диаметр, *h* — высота вертикального канала, *H* — высота резервуара, *D* горизонтальные размеры резервуара, *P* — область высокого давления в резервуаре

Fig. 6. Model of the Old Faithful Geyser system [26]. *Designations*: d — diameter, h — vertical channel height, H — reservoir height, D — horizontal dimensions of the reservoir, P — high pressure area in the reservoir

Следующий, третий, слой мощностью около 15 м имеет сопротивление от 2,5 до 10,0 Ом·м. Предположительно, он может быть отнесен к отложениям селевого потока 2014 г.

Четвертый слой (темно-синий на разрезе) имеет мощность от 1 до 2 м и достаточно низкое УЭС менее 2,5 Ом·м. Он равномерно выстилает ложе Долины гейзеров. Ориентировочно данный слой может быть отнесен к глинистым осадкам,



Рис. 7. Геоэлектрический разрез по профилю 2 через гейзер Большой с косой длиной 235 м

Fig. 7. Geoelectric section along the profile 2 through the Bolshoy Geyser with cable of 235 m long



Рис. 8. Геоэлектрические разрезы по профилю 2. Результаты измерений на гейзере Большой с косой длиной 235 м Fig. 8. Geoelectric sections along the profile 2. Results of the measurements at the Bolshoy Geyser with cable of 235 m long



Рис. 9. Разрезы относительных сопротивлений по профилю 2 на гейзере Большой с косой длиной 235 м Fig. 9. Sections of relative resistivity along profile 2 at the Bolshoy Geyser with cable of 235 m long



Рис. 10. Вариации электрических сопротивлений в семи точках геоэлектрического разреза на гейзере Большой с косой длиной 235 м Fig. 10. Variations of electrical resistivity at 7 points of the geoelectric section at the Bolshoy Geyser with cable of 235 m long

которые выпали из селевого потока, когда последний был остановлен оползневой плотиной и подпрудным озером 2007 г., расположенным ниже по течению реки.

Приповерхностный слой — слой современных аллювиальных отложений (пески, гравий и валунно-галечный материал) — имеет высокое УЭС (25– 50 Ом·м).

Одной из особенностей геоэлектрического разреза является наличие проводящего слоя, который оконтуривается вдоль левого борта речной долины на глубине порядка 5 м. Вероятно, это толща осадков, насыщенных минерализованными флюидами, которые выталкиваются на поверхность земли в районе пикета 210.

Далее детально рассмотрен водоносный горизонт, который обеспечивает перемещение флюида вниз к гейзеру Большой. Удельное сопротивление этого слоя составляет 1–2 Ом·м. Белыми стрелками на рис. 7 показано вероятное направление перемещения флюида вниз по склону. Мощность этого горизонта от 2–3 до 5–7 м.

На рис. 8 приведены геоэлектрические разрезы, полученные по результатам электромониторинга с косой длиной 235 м для симметричной установки Шлюмберже и дипольной установки.

Результаты мониторинга с этой косой, обеспечивающей сравнительно большую глубинность исследования, сильно сглаживаются на локальных аномалиях от сравнительно небольших объектов, размеры которых вблизи дневной поверхности составляют первые метры. Такими объектами являются жерла гейзеров. Пятиметровый шаг между электродами не позволяет обнаружить объекты, имеющие размеры меньше этой длины.

С помощью данной установки хорошо прослеживаются большие объекты, которые располагаются на средних глубинах в диапазоне от 20 до 30 м. Для мониторинга авторы отказались от использования трехэлектродной установки, поскольку на больших разносах соотношение «полезный сигнал / шум» для нее становится низким. Поэтому делать выводы по дифференциально-разностным геоэлектрическим разрезам в таких условиях неверно. Кроме этого, для высокой динамики съемки было необходимо обеспечить быстрый протокол опроса, который занимает не более 10 мин, чтобы за час работы сделать полных шесть снимков, уложившись в один полный цикл работы гейзера. Поэтому авторы использовали только обращенную симметричную установку *mABn*, которая дает возможность выполнить измерения по многоканальной технологии, а также имеет сравнительно небольшие геометрические коэффициенты и соответственно высокие сигналы в приемных линиях.

Разностные геоэлектрические разрезы представлены на рис. 9.

Результаты мониторинга с большой косой (235 м) показали, что значения удельных сопротивлений меняются в значительных пределах, как минимум $\pm 25\%$. Но существует множество точек, в которых сопротивление варьирует в полтора-три раза. Весь разрез разделяется на блоки по 10-20 м в диаметре. При этом с определенной долей уверенности можно утверждать, что геометрия этих блоков сохраняется (с некоторой точностью в несколько метров) на всем интервале времени выполненных измерений. Такое изменение границ объективно обусловлено определенной неустойчивостью самого алгоритма инверсии (рис. 10).

Следующая особенность полученных результатов — изменение знака приращений удельных сопротивлений в блоках геоэлектрического разреза. Производная сопротивлений во времени в большей части разреза синхронно меняется, испытывая квазигармонические изменения. Для обоснования этого факта в пределах центральной части профиля авторы выделили семь точек геоэлектрического разреза $\rho_i(x, z)$, которые расположены в пределах определенных блоков (см. рис. 10, а): точки под номерами 1, 3, 5 и 6 находятся на глубине 15-20 м, что соответствует абсолютной отметке 430 м; а точки 2, 4 и 7 — на глубине 25-30 м, что соответствует абсолютной высоте 420 м. Все точки расположены на расстоянии 20-30 м друг от друга. Для них были построены относительные изменения удельного сопротивления во времени (рис. 10, b). Предварительно результаты были сглажены путем удаления спорадических отклонений от средних значений. В итоге оказалось, что поведение сопротивлений на всех точках разреза и соответственно блоков, к которым они относятся, можно разделить на три типа: первый — с условно положительной фазой изменяющихся сопротивлений (точки 1, 3, 5), второй — с противоположным изменением свойств (точки 4 и 6) и третий это точки со слабыми изменениями электрических свойств (точки 7 и 2). В последнем случае можно отметить незначительное отклонение в сторону первого (точка 2) и второго (точка 7) типов.

Главной особенностью является трехчасовая периодичность выявленных аномалий вариаций удельных сопротивлений. Причина этого может скрываться только в особенностях гидрогеологического режима функциони-



Рис. 11. Геоэлектрические разрезы, полученные в ходе мониторинга с косой длиной 47 м на гейзере Большой Fig. 11. Geoelectric sections produced during monitoring with cable of 47 m long at the Bolshoy Geyser

рования Долины гейзеров. Здесь только следует напомнить, что период работы гейзера Крепость примерно соответствует трем часам. По-видимому, такое совпадение неслучайно.

Как показали первые оценки результатов с большой косой длиной 235 м, детальности полученных геоэлектрических разрезов с шагом между электродами 5 м оказалось недостаточно для выявления полной картины процессов, которые происходят в районе гейзера. Поэтому на заключительном этапе электротомографического мониторинга были выполнены измерения с косой 47 м и соответственно с шагом между электродами 1 м. Глубина исследования уменьшилась до 8–10 м. При этом дискретность и разрешающая способность возросли ориентировочно в 5 раз. Геоэлектрические разрезы показаны на рис. 11, а разностные — на рис. 12.

Разностные геоэлектрические разрезы указывают на то, что в районе гейзера Большой на глубинах ~ 3–6 м наблюдаются две зоны аномальных изменений УЭС. Амплитуда последних состав-







ляет порядка ± 40%. Горизонтальные и вертикальные размеры этих зон около 3–5 м. Одна из них располагается на глубине около 3 м, а другая — около 5– 6 м. Наблюдается синхронное изменение сопротивлений данных зон в противоположном направлении. В то время как одна из них становится более высокоомной, другая — более низкоомной. Такое согласованное изменение электрических свойств зон указывает на физическую взаимосвязь между ними. На рис. 13 изображена схема работы гейзера Большой. Прослеживается взаимодействие двух емкостей, которые далее для краткости авторы назвали Резервуар и Печь. Резервуар находится сверху, Печь — снизу.



Рис. 13. Схема работы гейзера Большой: фрагменты разностных геоэлектрических разрезов (а) и основные циклы работы гейзера (b). *Обозначения*: ВД — высокое давление, НД — низкое давление

Fig. 13. Scheme of the Bolshoy Geyser action: fragments of difference geoelectric sections (a) and main cycles of the geyser action (b)

После фонтанирования Резервуар опорожняется, и мгновенно падает давление в нижней емкости (Печь). Она быстро начинает заполняться водой и уже через 5–7 мин после завершения деятельности фонтана наполняется (см. рис. 13, стадия парения). В это время Резервуар полностью выпаривается и опустошается.

Вследствие образования воздушнопаровой смеси электрическое сопротивление Резервуара достигает значительных величин, а Печь наполняется водой и становится проводящей. После заполнения нижней емкости она перегревается, и в ней постепенно накапливается пар, который под все возрастающим давлением перегоняет воду наверх в Резервуар. Электрическое сопротивление этих емкостей постепенно меняется на противоположное: Резервуар заполняется проводящим флюидом, а Печь приобретает высокое сопротивление вследствие перехода флюида в парообразное состояние (см. рис. 13, стадия излияния). Постепенно давление растет и все повторяется заново: в определенный момент под действием пара начинается излияние воды из жерла гейзера, которое скачком переходит в фонтанирование, когда гидростатическое давление воды становится значительно меньше давления пара в Резервуаре (см. рис. 13, стадия фонтанирования).

С разными подробностями описанный алгоритм может быть истолкован по-разному, но в любом случае есть основание уверенно утверждать, что работа гейзера обеспечивается взаимодействием двух обнаруженных емкостей. При этом для функционирования системы должны совпасть множество физических параметров: определенные притоки воды, емкости Резервуара и Печи, которые должны быть примерно соизмеримы по объему, температура и давление перегретых растворов, глубина емкостей и размеры подводящих и соединительных каналов. Только определенное уникальное сочетание всех указанных параметров обеспечивает работу гейзера. Если соотношения меняются, то гейзеры перестают работать, как это и случилось в 2007 г. после катастрофического оползня.

Электротомографический

мониторинг на участке Косая Гора

Для сравнения результатов, полученных в Долине гейзеров, со спокойным участком в условиях средней полосы России были выполнены сравнительные электротомографические наблюдения с косой длиной 47 м в урочище Косая Гора в Юхновском районе Калужской области. Измерения проводились по протоколу, который использовался на гейзере Большой с однотипной станцией «Омега-48». На рис. 14, *а* показаны геоэлектрические разрезы, а на рис. 14, *b* — разностные разрезы после вычитания среднего геоэлектрического разреза. Поскольку изменения электрических сопротивлений здесь были примерно в 10–20 раз меньше, то сравнение разрезов можно было сделать путем вычитания среднего с отнесением к среднему

$$\delta \rho = \frac{\rho(x_i, z_j) - \rho_{\rm cp}(x_i, z_j)}{\rho_{\rm cp}(x_i, z_j)} \cdot 100\%,$$

где $\rho_{cp}(x_i, z_j)$ — среднее сопротивление по нескольким снимкам в точке геоэлектрического разреза, $\rho(x_i, z_j)$ — удельное сопротивление снимка в точке геоэлектрического разреза.

Можно отметить, что на участке Косая Гора аномальные электрические поля имеют крайне незначительные амплитуды, которые составляют в абсолютных величинах не более 1,5 Ом·м, что для средних значений удельных сопротивлений геоэлектрического разреза соответствует экстремальным аномалиям от 1 до 3%. Основная часть фоновых изменений сопротивления составляет около 1 Ом·м, что соответствует



Рис. 14. Геоэлектрические разрезы УЭС (а) и его относительных изменений (b), полученные в ходе мониторинга с косой длиной 47 м с шагом 1 м на участке Косая Гора

Fig. 14. Geoelectric sections of the electrical resistivity (a) and its relative changes (b) produced during monitoring with cable of 47 m long with a step 1 m at the Kosaya Gora site

аномалиям примерно 0,5–1,0%. Измерения производились 3 февраля 2021 г. в течение 1 ч. Их точность позволяет авторам надеяться на реальное существование таких вариаций удельного сопротивления.

Заключение

В результате электротомографических исследований, выполненных с большой косой (длина — 235 м) по протоколу трехэлектродной установки, было изучено геологическое строение Долины гейзеров до глубины 50-70 м. На глубинах более 30-40 м по протоколу симметричной четырехэлектродной установки Шмюмберже были выявлены более древние по отношению к вышележащим отложения, а также сложная структура оползневых тел. Кроме этого, оконтурены накопления, связанные с формированием селя, который сошел в 2014 г. Здесь прослеживается некоторое изменение электрических свойств, которые связаны с отложением первично более грубообломочного материала, а к

подножию плотины, которая сформировалась в результате схода оползня 2007 г., материал становится все более тонкодисперсным. Разрез завершается покровом глинистых отложений, которые осаждались из грязевого потока, сформировавшегося в результате перемешивания воды подпрудного озера с селем. Верхняя часть разреза мощностью 1–2 м представляет собой современные аллювиальные накопления, сложенные грубообломочным и песчаным материалом.

Анализ значений УЭС позволяет утверждать, что данные, полученные при элетротомографических исследованиях верхней части Долины гейзеров, соответствуют геологическим представлениям и могут быть использованы для построения детального геолого-геофизического разреза (см. рис. 3, 7).

Электротомографический мониторинг на гейзере Большой был выполнен с использованием двух кос длиной 235 и 47 м. Мониторинг с большой косой с шагом 5 м обеспечил глубинность 30– 40 м, но не дал возможности детально изучить важные процессы, связанные с работой гейзеров, происходящие в верхней части разреза. Вместе с тем, с помощью большой косы были установлены квазигармонические изменения УЭС с периодом около 3 ч. При этом можно отметить, что удельное сопротивление части блоков разреза меняется по одному гармоническому закону, а другой части — по прямо противоположному.

С помощью малой косы с шагом 1 м удалось увидеть изменения, которые происходят на глубинах до 8 м, и детально изучить работу гейзера. Поэтому авторы полагают, что с помощью малых кос с шагом между электродами 1 м можно более детально исследовать работу гейзера. Установлено, что система гейзера Большой состоит из двух подземных емкостей, находящихся на разных глубинах (условно названы Резервуар и Печь). Предполагается, что емкости соединены каналами, по которым поступают вода и пар. Очевидно, что Резервуар имеет выводной канал на дневную поверхность. Эта емкость находится сверху, через нее прокачивается вода и происходит смешение в верхней части разреза холодной воды и флюида. Печь располагается ниже, здесь активно меняется температура и давление, которое передается в Резервуар. Поэтому без емкости Печь гейзер Большой функционировать не может. Размеры этих емкостей соизмеримы с выбросами флюида на поверхность объемом порядка 15-20 м³ для гейзера Большой. По мнению авторов, вертикальный канал, который наблюдался с помощью видеокамеры, опускаемой в гейзер Большой ранее, — это только часть верхней системы, а остальная часть структуры осталась скрытой. Объем вертикального канала, который переходит в жерло, составляет около 3,5 м³ (см. рис. 5, b). По авторским данным, объем Резервуара примерно в 5–7 раз больше объема вертикального канала. Таким образом, в системе гейзера Большой синхронно работают две емкости, которые по определенному природному алгоритму заполняются жидкостью, а потом под действием пара выталкивают эту жидкость из Резервуара наверх.

Для сравнения результатов, полученных в Долине гейзеров, были выполнены сравнительные электротомографические наблюдения с косой длиной 47 м в урочище Косая Гора в Юхновском районе Калужской области. Они показали, что в условиях средней полосы России аномальные электрические поля имеют крайне незначительные амплитуды (см. рис. 14, *b*).

Опыт применения ЭТ показал эффективность данного метода в изучении геологического строения районов распространения гейзеров. Дальнейшие научные исследования в данном направлении позволят, по мнению авторов, разработать методические рекомендации и обосновать использование метода для решения научно-практических задач.

Список литературы

- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., 2014. Как устроены гейзеры и почему их много в Долине Гейзеров? В сб. статей под ред. А.П. Никанорова, Труды Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника, Вып. 3. ООО «СТП», Воронеж, с. 142–151.
- 2. Белоусов В.И., Гриб Е.Н., Леонов В.Л., 1983. Геологические позиции гидротермальных систем Долины Гейзеров и кальдеры Узон. Вулканология и сейсмология, № 1, с. 1–11.
- 3. Дрознин В.А., 1982. К теории действия гейзеров. Вулканология и сейсмология, № 5, с. 49-60.
- 4. Леонов А.В., 2017. Каталог гейзеров Кроноцкого заповедника. Долина гейзеров и кальдера вулкана Узон: история и современность. Реарт, Москва.
- 5. Манштейн Ю.А., Бортникова С.Б., Манштейн А.К., Гавриленко Т.М., Берниковская И.В., Сезько Н.П., 2008. Особенности строения проводящих каналов термальных источников вулкана Мутновский (Южная Камчатка). Доклады Академии наук, Том 423, № 3, с. 383–388.
- 6. Модин И.Н., Макаров Д.В., Александров П.Н., 2014. Возможности электротомографических станций при выполнении мониторинговых наблюдений. Инженерные изыскания, № 9–10, с. 22–31.
- 7. Мороз Ю.Ф., Карпов Г.А., Мороз Т.А., Николаева А.Г., Логинов В.А., 2014. Геоэлектрическая модель кальдеры Узон на Камчатке. Вулканология и сейсмология, № 5, с. 38–51, https://doi.org/10.7868/S020303061405006X.
- Нечаев А.М., 2012. О механизме извержения гейзера. В сб. статей под ред. В.И. Мосолова, Труды Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника, Вып. 2. Камчатпресс, Петропавловск-Камчатский, с. 135–143.
- Панин Г.Л., Котенко Т.А., Ельцов Т.И., 2013. Выяснение причины гидротермального взрыва группы фумарол Юго-Восточного поля вулкана Эбеко по данным малоглубинного мониторинга аппаратурой электротомографии. Инженерная геофизика-2013, Материалы 9-й Международной научно-практической конференции и выставки EAGE, Геленджик, 2013, с. 1–8, https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142498.
- 10. Панин Г.Л., Котенко Т.А., Котенко Л.В., Карин Ю.Г., 2010. Геофизико-геохимические исследования термальных полей вулкана Эбеко (о. Парамушир). Литосфера, № 3, с. 171–176.
- 11. Смелкова А.Ю., 2007. Роль вулканических процессов в формировании ландшафтов Камчатки. URL: http://www.kamchatsky-krai.ru/geography/volcanoes/smelkova-volcano/2.htm (дата обращения: 02.11.2020).
- 12. Сугробов В.М., Сугробова Н.Г., Дрознин В.А., Карпов Г.А., Леонов В.Л., 2009. Жемчужина Камчатки Долина гейзеров. Камчатпресс, Петропавловск-Камчатский.
- 13. Устинова Т.И., 1955. Камчатские Гейзеры. Географгиз, Москва.
- 14. Фролова Ю.В., Гвоздева И.П., Чернов М.С., Кузнецов Н.П., 2015. Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород Долины Гейзеров (полуостров Камчатка). Инженерная геология, № 6, с. 30–42.
- 15. Штейнберг Г.С., Штейнберг А.С., Мержанов А.Г., 1984. Гейзеры. Природа, № 4, с. 32–47.
- 16. Allen E.T., Day A.L., 1935. Hot springs of the Yellowstone National Park. Publication No. 466. Publishing house of the Carnegie Institute of Washington, Washington, DC, USA.
- Bunsen R.W., 1847. Physikalische Beobachtungen uber die hauptsachlichsten Geysir Islands. Annalen der Physik, Vol. 148, Issue 9, pp. 159–170, https://doi.org/10.1002/andp.18471480911.
- Drahor M.G., Berge M.A., Bakak Ö., Özturk C., 2011. An example of electrical resistivity tomography monitoring in geothermal sites: Balçova-Izmir Case Study. Geoelectric monitoring current research and perspectives for the future, Book of extended abstracts of the International Workshop, Vienna, Austria, 2011, pp. 31–42.

- Hermans T., Daoudi M., Vandenbohede A., Robert T., Caterina D., Nguyen F., 2011. Comparison of temperature estimates from heat transport model and electric resistivity tomography during a shallow heat injection and storage experiment. Geoelectric monitoring current research and perspectives for the future, Book of extended abstracts of the International Workshop, Vienna, Austria, 2011, pp. 43–48.
- Hermans T., Vandenbohede A., Lebbe L., Nguyen F., 2012. A shallow geothermal experiment in a sandy aquifer monitored using electric resistivity tomography. Geophysics, Vol. 77, No. 1, pp. B11–B21, https://doi.org/10.1190/geo2011-0199.1.
- Hermans T., Wildemeersch S., Jamin P., Orban P., Brouyère S., Dassargues A., Nguyen F., 2015. Quantitative temperature monitoring of a heat tracing experiment using cross-borehole ERT. Geothermics, Vol. 53, pp. 14–26, https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.03.013.
- 22. Hutchinson R.A., Westphal J.A., Kieffer S.W., 1997. In situ observations of Old Faithful Geyser. Geology, Vol. 25, No. 10, pp. 875–878, https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0875:ISOOOF>2.3.CO;2.
- Lesparre N., Robert T., Nguyen F., Boyle A., Hermans T., 2018. 4D electrical resistivity tomography (ERT) for aquifer thermal energy storage monitoring. Geothermics, Vol. 77, pp. 368–382, https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.10.011.
- 24. Lloyd E.F., 1972. Geology and hot springs of Orakeikorako. Publishing house of the New Zealand Geological Survey, Wellington, New Zealand.
- Lu X., Watson A., 2005. A review of progress in understanding of geysers. Proceedings of the World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 2005, pp. 1–6.
- Rudolph M.L., Manga M., Hurwitz S., Johnston M., Karlstrom L., Wang C.-Y., 2012. Mechanics of Old Faithful Geyser, Calistoga, California. Geophysical Research Letters, Vol. 39, Issue 24, Article No. L24308, https://doi.org/10.1029/2012GL054012.
- Steinberg G.S., Merzhanov A.G., Steinberg A.S., Rasina A.A., 1982. Geyser process: its theory, modeling, and field experiment. Part 2. A laboratory model of a geyser. Modern Geology, Vol. 8, No. 2, pp. 71–74.

References

- Belousov A.B., Belousova M.G., 2014. How geysers are arranged and why there are many of them in the Valley of Geysers? In A.P. Nikanorov (ed.), Transactions of the Kronotsky state natural biosphere reserve, Issue 3. STP LLC, Voronezh, pp. 142–151. (in Russian)
- Belousov V.I., Grib E.N., Leonov V.L., 1983. Geological positions of hydrothermal systems of the Valley of Geysers and Uzon caldera. Vulkanologiya i Seysmologiya, No. 1, pp. 1–11. (in Russian)
- 3. Droznin V.A., 1982. To the theory of the geysers' action. Vulkanologiya i Seysmologiya, No. 5, pp. 49-60. (in Russian)
- 4. Leonov A.V., 2017. Catalog of geysers of the Kronotsky reserve. Valley of geysers and caldera of Uzon Volcano: history and modernity. Reart, Moscow. (in Russian)
- Manshtein Yu.A., Bortnikova S.B., Manstein A.K., Gavrilenko G.M., Vernikovskaya I.V., Sezko N.P., 2008. Structure features of convective channels from thermal sources in Mutnovskii Volcano (South Kamchatka). Doklady Akademii Nauk, Vol. 423, No. 3, pp. 383–388. (in Russian)
- Modin I.N., Makarov D.V., Aleksandrov P.N., 2014. Potential of resisitivity stations for electrical monitoring. Engineering Survey, No. 9–10, pp. 22–31. (in Russian)
- Moroz Yu.F., Karpov G.A., Moroz T.A., Nikolaeva A.G., Loginov V.A., 2014. A geoelectric model for the Uzon caldera, Kamchatka. Vulkanologiya i Seysmologiya, No. 5, pp. 38–51. (in Russian)
- 8. Nechaev A.M., 2012. On the mechanism of the geyser eruption. In V.I. Mosolov (ed.), Transactions of the Kronotsky state natural biosphere reserve, Issue 2. Kamchatpress, Petropavlovsk-Kamchatsky, pp. 135–143. (in Russian)
- Panin G.L., Kotenko T.A., Eltsov T.I., 2013. Elucidation of the cause of the hydrothermal explosion of a group of fumaroles in the South-Eastern field of the Ebeko Volcano based on the data of shallow monitoring by electrotomography equipment. Engineering Geophysics-2013, Proceedings of the 9th EAGE International scientific and practical Conference and Exhibition, Gelendzhik, 2013, pp. 1–8, https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142498. (in Russian)
- Panin G.L., Kotenko T.A., Kotenko L.V., Karin U.G., 2010. Geophysical and geochemical investigations of thermal fields of Ebeko volcano (Paramushir Island). Litosfera, No. 3, pp. 171–176. (in Russian)
- 11. Smelkova A.Yu., 2007. The role of volcanic processes in the formation of Kamchatka landscapes. URL: http://www.kamchatsky-krai.ru/geography/volcanoes/smelkova-volcano/2.htm (accessed: 2 November 2020). (in Russian)
- 12. Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Droznin V.A., Karpov G.A., Leonov V.L., 2009. The pearl of Kamchatka the Valley of Geysers. Kamchatpress, Petropavlovsk-Kamchatsky. (in Russian)
- 13. Ustinova T.I., 1955. Geysers of Kamchatka. Geografgiz, Moscow. (in Russian)
- 14. Frolova Ju.V., Gvozdeva I.P., Chernov M.S., Kuznetsov N.P., 2015. Engineering-geological aspects of hydrothermal alterations of tuffaceous rocks in the Geysers Valley (Kamchatka Peninsula). Inzhenernaya Geologiya, No. 6, pp. 30–42. (in Russian)
- 15. Steinberg G.S., Steinberg A.S., Merzhanov A.G., 1984. Geysers. Priroda, No. 4, pp. 32-47. (in Russian)

- 16. Allen E.T., Day A.L., 1935. Hot springs of the Yellowstone National Park. Publication No. 466. Publishing house of the Carnegie Institute of Washington, Washington, DC, USA.
- 17. Bunsen R.W., 1847. Physikalische Beobachtungen uber die hauptsachlichsten Geysir Islands. Annalen der Physik, Vol. 148, Issue 9, pp. 159–170, https://doi.org/10.1002/andp.18471480911.
- Drahor M.G., Berge M.A., Bakak Ö., Özturk C., 2011. An example of electrical resistivity tomography monitoring in geothermal sites: Balçova-Izmir Case Study. Geoelectric monitoring current research and perspectives for the future, Book of extended abstracts of the International Workshop, Vienna, Austria, 2011, pp. 31–42.
- Hermans T., Daoudi M., Vandenbohede A., Robert T., Caterina D., Nguyen F., 2011. Comparison of temperature estimates from heat transport model and electric resistivity tomography during a shallow heat injection and storage experiment. Geoelectric monitoring current research and perspectives for the future, Book of extended abstracts of the International Workshop, Vienna, Austria, 2011, pp. 43–48.
- Hermans T., Vandenbohede A., Lebbe L., Nguyen F., 2012. A shallow geothermal experiment in a sandy aquifer monitored using electric resistivity tomography. Geophysics, Vol. 77, No. 1, pp. B11–B21, https://doi.org/10.1190/geo2011-0199.1.
- 21. Hermans T., Wildemeersch S., Jamin P., Orban P., Brouyère S., Dassargues A., Nguyen F., 2015. Quantitative temperature monitoring of a heat tracing experiment using cross-borehole ERT. Geothermics, Vol. 53, pp. 14–26, https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.03.013.
- 22. Hutchinson R.A., Westphal J.A., Kieffer S.W., 1997. In situ observations of Old Faithful Geyser. Geology, Vol. 25, No. 10, pp. 875–878, https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0875:ISOOOF>2.3.CO;2.
- 23. Lesparre N., Robert T., Nguyen F., Boyle A., Hermans T., 2018. 4D electrical resistivity tomography (ERT) for aquifer thermal energy storage monitoring. Geothermics, Vol. 77, pp. 368–382, https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.10.011.
- 24. Lloyd E.F., 1972. Geology and hot springs of Orakeikorako. Publishing house of the New Zealand Geological Survey, Wellington, New Zealand.
- 25. Lu X., Watson A., 2005. A review of progress in understanding of geysers. Proceedings of the World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 2005, pp. 1–6.
- Rudolph M.L., Manga M., Hurwitz S., Johnston M., Karlstrom L., Wang C.-Y., 2012. Mechanics of Old Faithful Geyser, Calistoga, California. Geophysical Research Letters, Vol. 39, Issue 24, Article No. L24308, https://doi.org/10.1029/2012GL054012.
- Steinberg G.S., Merzhanov A.G., Steinberg A.S., Rasina A.A., 1982. Geyser process: its theory, modeling, and field experiment. Part 2. A laboratory model of a geyser. Modern Geology, Vol. 8, No. 2, pp. 71–74.

Информация об авторах

МОДИН ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ

Профессор кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; генеральный директор ООО «НПЦ Геоскан», д.т.н., г. Москва, Россия

СКОБЕЛЕВ АЛЕКСЕЙ ДЕНИСОВИЧ

Ведущий геофизик ООО «НПЦ Геоскан», г. Москва, Россия; инженер кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

ВАЛИУЛИНА АЛИНА МАРАТОВНА

Магистрант кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Information about the authors

IGOR N. MODIN

DSc (Technics); Professor in the Department of Geophysical Methods for the Study of the Earth's Crust, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; General Director of the Research and Production Center Geoscan LLC; Moscow, Russia

ALEXEY D. SKOBELEV

Leading geophysicist of the Research and Production Center Geoscan LLC; Moscow, Russia; Engineer of the Department of Geophysical Methods for the Study of the Earth's Crust, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia

ALINA M. VALIULINA

Master Student of the Department of Geophysical Methods for the Study of the Earth's Crust, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia

