

## ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В КАЛЬДЕРЕ УЗОН НА ГЕЙЗЕРЕ ШАМАН (ПОЛУОСТРОВ КАМЧАТКА)

© 2023 И.Н. Модин, А.Д. Скобелев, А.М. Валиулина, В.С. Степченков

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 119991;  
e-mail: imodin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 28.04.2023 г.; после доработки 28.08.2023 г.; принята в печать 25.12.2023 г.

В 2020 г. в кальдере вулкана Узон (п-ов Камчатка) выполнены электроразведочные исследования методом электротомографии в пределах восточного термального поля близ гейзера Шаман. Геоэлектрический разрез по уровню удельных электрических сопротивлений разделяется на три зоны: относительно высокоомные «холодные» по краям и относительно низкоомную «горячую» в центре. Горячая зона, в пределах которой расположен гейзер, выделяется аномально низким сопротивлением (менее 0.5 Ом·м) на глубине от 5 до 20 м, что указывает на наивысшую трещиноватость и насыщенность флюидом грунтов в этом месте. Над гейзером с помощью электротомографической станции Омега-48 и двух кос длиной 235 и 47 м выполнен электрический мониторинг. Первая коса обеспечила глубину исследования 60 м, вторая — около 12 м. На разностных геоэлектрических разрезах по результатам мониторинга выделяются четыре фазы работы гейзера: наполнение, излияние, фонтанирование и парение в виде чередования положительных и отрицательных аномалий электрического поля. По результатам площадных измерений удалось выявить подводящий к гейзеру канал.

*Ключевые слова: п-ов Камчатка, кальдера Узон, гейзер, электротомография, электрический мониторинг.*

### ВВЕДЕНИЕ

Гейзер Шаман находится на Камчатке в кальдере вулкана Узон в 12 км от Долины Гейзеров. Уникальность этого объекта состоит в том, что это единственный работающий гейзер в кальдере, тогда как в Долине Гейзеров в разное время насчитывалось до 200 работающих гейзеров. В настоящее время Шаман производит извержения горячей воды с периодом примерно 70 минут (2020 г.). Как правило, фонтанирование сопровождается двумя-тремя выбросами воды с периодом около 1 минуты. Шаман расположен на сравнительно ровной, легко доступной площадке в 200 м от Визит-центра туристического кордона «Узон» Кроноцкого заповедника. Название Шаман получил благодаря местному населению, которому долгое время удавалось скрывать от русских и советских исследователей тайну о существовании Долины Гейзеров и Кальдеры Узон (Карпов, 2010). Периодичность работы Шамана довольно сильно изменилась

со времени его открытия. Однако во время наших исследований, которые продолжались около двух недель, гейзер вел себя вполне предсказуемо, отменяя извержения только в двух случаях. По масштабам своей активности его следует отнести к гейзерам средней величины. Он функционирует уже около 15 лет вместо потухшего гейзера Светлана, который работал с 1968 г. по 1976 г. и располагался в 250 м от Шамана (Леонов, 2017).

Новый гейзер Шаман открыл инспектор Кроноцкого заповедника Роберт Чуприн (Карпов, 2010). В сентябре 2008 г. на месте округлого, диаметром 1.5 м бессточного источника с пульсирующим режимом стал периодически выбрасываться фонтан воды и пара на высоту 1–1.5 м. Выбросы были очень кратковременными и содержали много частиц породы — грязи. Характерно, что в начальный период работы гейзера его воронкообразный грифон после извержения полностью осушался, т.е. обнажалось устье канала гейзера. В начале лета 2009 г.

гейзер уже работал достаточно мощно, выбрасывая струю воды и пара на высоту до 4–7 м. Только в июле 2009 г. научным сотрудникам Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН удалось побывать на Узоне и захронометрировать работу гейзера, которому они дали название «Шаман» (Карпов, 2010). При первых посещениях Шамана был зафиксирован редкий бимодальный режим работы гейзера, в котором период между извержениями фонтанов составлял либо 12 минут, либо 20 минут (Леонов, 2017). При этом короткопериодных извержений было примерно на 70% больше, чем длиннопериодных.

Основная гипотеза возникновения гейзера Шаман, которая поддерживается камчатскими учеными (Двигало, Мелекесцев, 2009; Карпов, 2010), связана с событием 2007 г., когда произошел сход каменной лавины в Долине Гейзеров, что привело к временному перерыву работы части гейзеров и уничтожению другой части гейзеров. По их мнению, в 2007 г. произошла активизация тектономагматической деятельности в блоке земной коры в районе вулкана Кихпинич. В зону воздымания были вовлечены и тектонически активные участки Восточного термального поля в кальдере Узон. В пользу этого предположения свидетельствуют явления, которые произошли в кальдере, произошедшие в 2007 г. Например, здесь наблюдалось повышение температуры в озере Банное. На втором (западном) участке Восточного термального поля возник грязевый вулкан, а на первом (юго-восточном) участке этого поля осушился большой участок в районе источника Термофильный. В 2008 г. появились провалы и новые парящие площадки в районе источника «Пульсирующий», на месте которого осенью 2008 г. и появился гейзер Шаман.

По определению гейзер — горячий источник, периодически выбрасывающий фонтаны горячей воды и пара под сильным давлением. Гейзеры являются одним из проявлений поздних стадий вулканизма, распространены в областях современной вулканической деятельности.

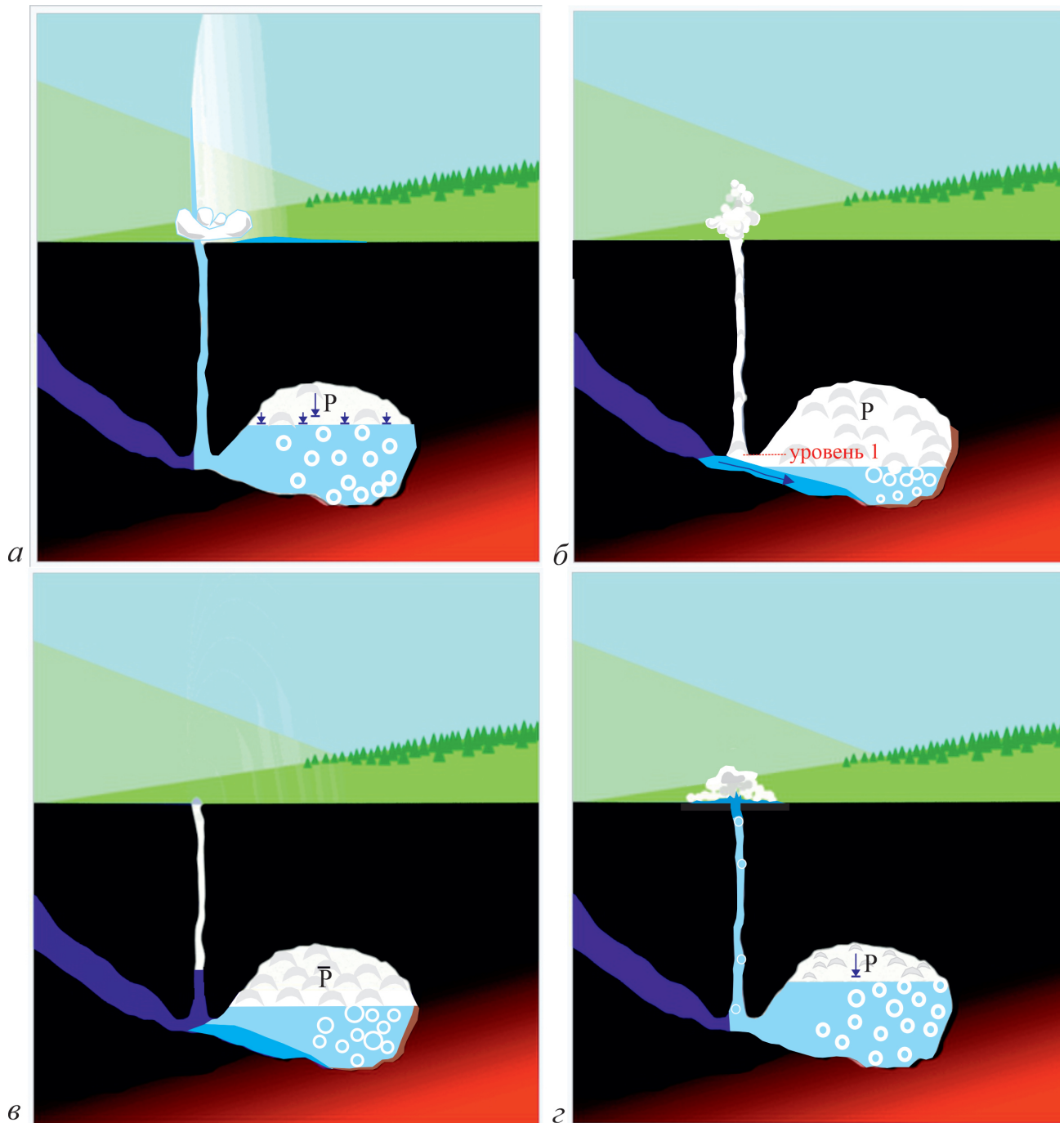
Деятельность гейзера характеризуется периодической повторяемостью нескольких стадий (Белоусов, Белоусова, 2014). Классическая последовательность событий при извержении гейзера состоит из трёх фаз: медленного и постепенно нарастающего истечения воды (фаза излива), активного выброса воды с паром (фаза фонтанирования) и последующего выхода пара с постепенно уменьшающейся интенсивностью (фаза парения). Также существуют гейзеры (Сугробов, 2009), у которых можно выделить еще одну фазу — фазу покоя, которая следует за фазой парения. При этом самой короткой и наиболее характерной является наиболее четко проявлен-

ная стадия фонтанирования или извержения, поэтому имеет смысл поставить ее первой в схеме действия гейзера: фонтанирование, парение, покой и излив.

Причина периодической деятельности гейзеров давно привлекала к себе внимание ученых. Было несколько попыток разгадать ее, но наиболее основательная принадлежит Р. Бунзену и А. Деклюазо (Bunsen, 1847; Wentrup, 2021). Они предположили, что вода в глубине гейзера находится в перегретом состоянии, но она не кипит, потому что давление столба воды достаточно, чтобы задержать кипение. От нижних слоев воды идет передача высокой температуры к верхним, и, когда верхние слои закипают, сразу установившееся равновесие нарушается и вода, находящаяся под давлением, моментально обращается в пар, выбрасывает вышележащую воду, за которой выходит и сам пар. Для передачи более высокой температуры от нижних слоев к верхним в различных гейзерах необходимо разное время, вот почему гейзеры извергаются с разной периодичностью.

Исходя из общефизических представлений, последовательность событий можно объяснить следующим образом. Из перегретой камеры, которая находится под огромным внутренним давлением, через гейзерный канал происходит выброс кипящей воды в виде фонтана (рис. 1а). После того как резервуар был опустошен, давление внутри него резко падает и постепенно остатки воды, превращаясь в пар, выходят из жерла на поверхность земли до тех пор, пока количество воды в резервуаре не перекроет уровень поступления воды в камеру (рис. 1б). С этого момента резервуар начинает заполняться холодной водой, часть которой, нагреваясь, попадает в гейзерный канал и перекрывает его, уравнивая своим поднимающимся столбом нарастающее давление внутри камеры резервуара. Наступает стадия наполнения, которая за счет перегрева воды внутри резервуара сопровождается постепенным нарастанием давления, что вызывает подъем столба воды в гейзерном канале (рис. 1в). Внешне это проявляется в виде стадии покоя. На самом деле в это время происходит интенсивная подготовка к взрыву: вода из холодного канала поступает в резервуар, быстро нагревается, внутри резервуара происходит постепенное увеличение давления и столб воды постепенно поднимается к поверхности земли. Наконец вода подходит к жерлу и начинает изливаться на землю (рис. 1г). Начинается последняя стадия развития процесса. В какой-то момент давление падает, перегретая вода превращается в пар и происходит взрыв.

При этом существуют гейзеры, у которых продолжительность отдельных стадий



**Рис. 1.** Стадии развития гейзерного процесса: а — фонтанирование; б — парение; в — наполнение; г — излияние.

**Fig. 1.** Stages of geyser action: а — spouting; б — soaring; в — filling; г — outpouring.

измеряется десятками минут, а у других гейзеров полный цикл длится от нескольких часов до нескольких дней (Леонов, 2017). Временные интервалы и сила выбросов зависят от размера гейзера (объёма извергаемой воды и соответственно подземных резервуаров), места нахождения, конструкции жерла, геометрии и высоты подводящего канала. Важным обстоятельством является температурный режим вмещающего горного массива и функционирование гидро-геологических процессов. Безусловно, что это очень сложный физический процесс, в котором происходит постоянное балансирование на грани фазовых превращений определенных масс воды при условии достижения критических значений давления, температуры, объема пара и жидкости. Постоянно сменяемые картинки физического состояния гейзера, по сути, являются уникальным явлением природы, доведенным до автоматизма, подобно механизму работы двигателя внутреннего сгорания. При разбалансировке хотя бы одного из необходимых физических, геологических и гидрогеологических условий гейзер прекращает свое существование. В неживой природе такие сложные системы представлены только гейзерами и вулканами.

Крупные гейзерные поля известны в пяти странах: Долина гейзеров и кальдера Узон на Камчатке в России — около 200 гейзеров; «Страна гейзеров» в Исландии — 250 групп гейзерных полей; Йеллоустонский национальный парк в США — от 300 до 500 гейзеров; на Северном острове в Новой Зеландии — 60 гейзеров; долина гейзеров Эль-Татио в Чили — около 80 гейзеров (Белоусов, Белоусова, 2014).

**Геологическое строение кальдеры вулкана Узон.** Вулкан Узон был одним из первых стратовулканов, поднявшихся над землей на трехкилометровую высоту (Белоусов и др., 1983). Около 40 тыс. лет назад Камчатка испытала цикл вулканической активности. В результате катастрофические извержения разрушили сам Узон. При этом от него остался сравнительно небольшой полуторакилометровый останец, под которым образовался частично опустошённый магматический очаг. В результате произошел провал его кровли и проседание поверхности земли, образуя Узон-Гейзерную вулканотектоническую депрессию. Пониженные участки рельефа внутри кальдеры аккумулировали воду, и внутри депрессии образовалась система озер, над поверхностью которых выросли экструзивные лавовые купола (Брайцева и др., 1974). Гейзер Шаман расположен в центре термального поля.

Гидротермальные системы Долины Гейзеров и кальдеры Узон входят в Семячинский геотермальный район, который структурно

приурочен к центральной части грабенсинклинали Восточной Камчатки (рис. 2а) (Белоусов и др., 1983). Район сложен вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами плиоцен-плейстоценового возраста.

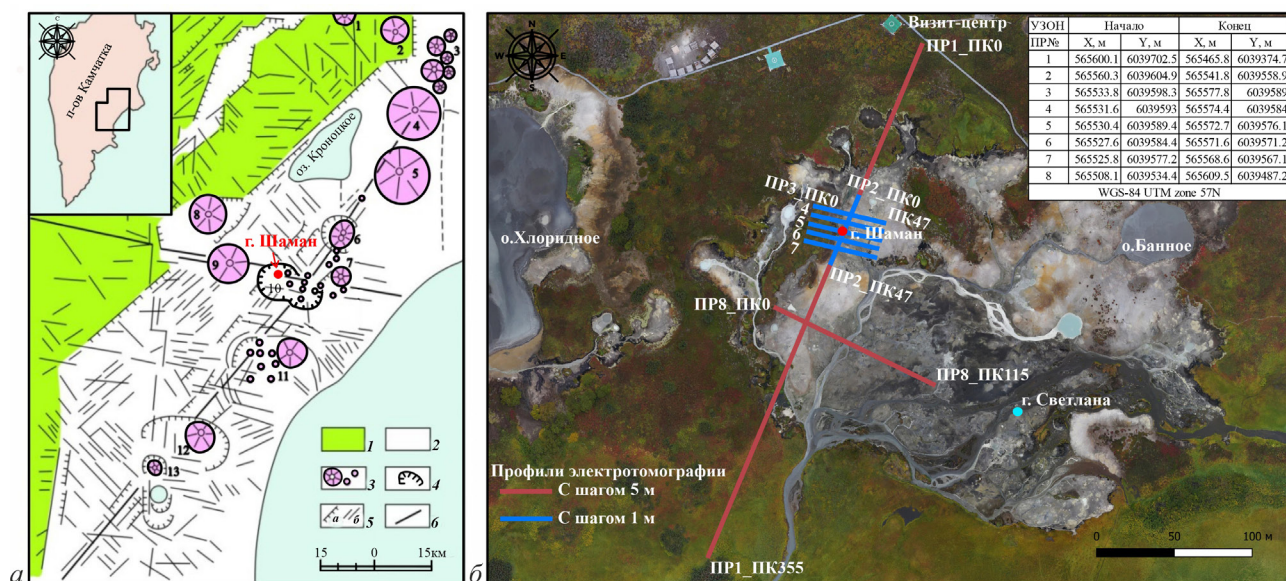
**Методика электротомографических наблюдений.** Измерения были проведены по серии профилей общей длиной 752 м (рис. 2б). При этом был выполнен профиль 1 северо-восточного простирания длиной 355 м с шагом между электродами 5 м, 6 профилей (со второго по седьмой) с шагом 1 м и профиль 8 с шагом 5 м с пассивной записью электрического поля земли без включения тока. В качестве основных установок использовались трехэлектродные установки  $Amn+mnV$ , дипольная осевая  $ABmn$  и инвертированная симметричная установка Шлюмберже  $mABn$ .

Для трехэлектродной установки при измерениях по большому профилю 1 использовались три длины приемных линий  $MN$ : 5, 15 и 25 м и максимальный разнос  $AO$  соответственно составил 190 м, что обеспечило глубинность исследования около 70–80 м. Для дипольной установки разнос  $OO'/2$  при большой длине  $MN$  составил 105 м, а для установки Шлюмберже  $AB/2 = 90$  м в центре установки. Длина одной раскладки кос составляла 235 м. По профилю 1 было выполнено 2 раскладки, а соседние по профилю раскладки осуществлялись с перекрытием в 50%, что позволяет получать непрерывный профиль с заданной глубинностью и оценить точность измерений на перекрытиях разных расстановок, которая составила 3%. Для регистрации сигналов использовалась станция Омега-48 производства ООО «Логис» (г. Раменское, МО). Общее количество измерений на одной раскладке — 2446.

На 5-ти коротких профилях (рис. 2б, профили 3–7) выполнена площадная двумерная съемка симметричной установкой Шлюмберже. Так как максимальный разнос при этом составил 23.5 м, то глубина исследования при этом была около 10 м. На малых профилях 2 и 5 были выполнены мониторинговые измерения.

Для обработки данных и подготовки значений поля к двумерной инверсии в геоэлектрический разрез использовалась программа  $X2IP1$  (автор А.А. Бобачев). На следующем этапе с помощью программного обеспечения  $Res2DInv$  (Loke, Barker, 1996) был произведен подбор оптимальных параметров инверсии и проведена двумерная инверсия данных. Перед началом инверсии все измеренные данные собирались в один массив, а потом независимо от того с какой установкой это было получено, программа инверсии подбирает один геоэлектрический разрез, который соответствует минимуму функционала невязки между





**Рис. 2.** Структурная схема центрального участка Восточной Камчатки (составлена на основе дешифрирования космических фотоснимков м-ба 1:1 000 000) по В.Л. Леонову (Леонов, 1989) (а) и схема профилей электротомографии в Кальдере Узон (б): 1 — горстантиклиналь Восточного хребта Камчатки; 2 — грабенсинклиналь восточной Камчатки; 3 — вулканы (1 — Кизимен, 2 — Конради, 3 — Гамченский ряд, 4 — Шмидта; 5 — Кроноцкий, 6 — Крашенинникова, 7 — Кихпинич, 8 — Унана, 9 — Тауншиц, 10 — Узон, 11 — Большой Семячик, 12 — Малый Семячик, 13 — Карымский); 4 — кальдеры и вулcano-тектонические депрессии; 5 — разрывные нарушения: а — сбросы; б — трещины; 6 — осевые линии зон региональных разломов северо-восточного и субширотного простирания, пересекающих Узон-Гейзерный район.

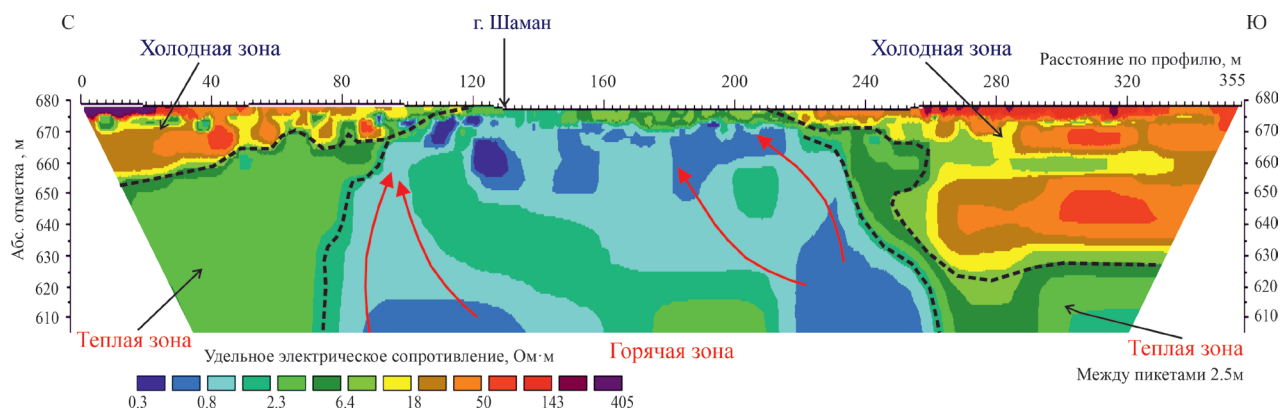
**Fig. 2.** Structural diagram of the Central section of Eastern Kamchatka (compiled on the basis of space image interpretation at a scale of 1: 1 000 000) according to V.L. Leonov (Leonov, 1989) (a) and Schematic map of the electrotomographic profiles in the Uzon Caldera (b): 1 — horstanticline of the Vostochny Ridge of Kamchatka; 2 — grabensyncline of eastern Kamchatka; 3 — volcanoes (1 — Kizimen, 2 — Konradi, 3 — Gamchensky row, 4 — Schmidt); 5 — Kronotsky, 6 — Krashenninnikov, 7 — Kikhpinych, 8 — Unana, 9 — Taunshits, 10 — Uzon, 11 — Bolshoy Semyachik, 12 — Maly Semyachik, 13 — Karymsky); 4 — calderas and volcano-tectonic depressions; 5 — discontinuous faults: a — faults; b — cracks; 6 — axial lines of the zones of regional faults of the northeast and sublatitudinal strike, crossing the Uzon-Geyser region.

полевыми и теоретическим значениями кажущегося сопротивления. В нашем случае средняя точность подбора составила 4.2 %, что является удовлетворительным результатом. В результате электротомографических исследований построены геоэлектрические разрезы  $\rho(x, z)$ .

**Электротомография по профилю 1, пересекающему Восточное Термальное поле.** В результате электротомографических исследований по профилю 1 построен геоэлектрический разрез на глубину до 60 м через Восточное Термальное поле (рис. 3). Показано, что высота поверхности Земли меняется здесь незначительно — от 680 м на севере в начале профиля до 675 м в центре в районе гейзера Шаман. Геоэлектрический разрез имеет зеркально симметричное строение относительно центра профиля. Верхняя часть разреза на юге и севере до глубины 20–40 м представлена холодными грунтами, которые имеют сравнительно высокое удельное сопротивление более 6–10 Ом·м. При этом, чем выше абсолютные отметки, тем выше сопротивление. В районе ПК 0–20 сопротивление на поверхности земли становится более 100 Ом·м, что позволяет здесь

развиваться обычным травянистым растениям и даже кедровому стланнику. Под холодными зонами расположена названная нами условно «Теплая зона», которая имеет сопротивление от 2 до 6 Ом·м. Она располагается на глубинах более 5–7 м и является промежуточной между Холодной и Горячей зоной, которая расположена в центре участка и выделяется электрическими сопротивлениями менее 1–2 Ом·м. На глубине около 50 м выявлены две аномальные хорошо проводящие зоны, каждая из которых имеет горизонтальные размеры около 30–40 м, которые на наш взгляд являются источниками поступления горячего флюида к поверхности земли.

Вся центральная часть Термального поля шириной около 120 м имеет приблизительно одинаковое строение. Слой грунта мощностью около 3–5 м имеет удельное сопротивление более 2 Ом·м залегает сверху. Под ним расположена зона высокой электрической проводимости (удельное сопротивление менее 1 Ом·м), которая распространяется на глубину 40–50 м, сильно насыщенная горячим флюидом. Вероятно, поступление горячего флюида в верхнюю часть разреза



**Рис. 3.** Геоэлектрический разрез по результатам инверсии электротомографических данных по профилю 1. Положение профиля приведено на рис. 2. Красными стрелками показаны пути миграции флюида.

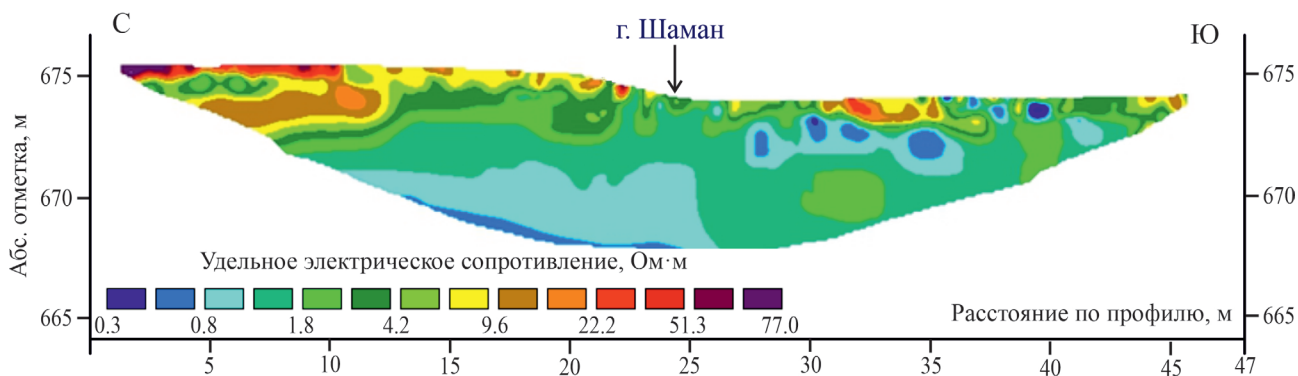
**Fig. 3.** Geoelectric section based on the results of inversion of electrotomographic data along profile 1. The profile position is shown in fig. 2. Red arrows show fluid migration paths.

происходит по периферийным зонам. Зона, в пределах которой расположен гейзер Шаман, выделяется аномально низким сопротивлением (менее 0.5 Ом·м) на глубине от 5 до 20 м, что указывает на наивысшую трещиноватость и кавернозность грунтов в этом месте.

По профилю 2 электротомография выполнена с малой косой с шагом 1 м (рис. 4). В северной части профиля четко проявилось разделение верхнего высокоомного слоя на три горизонта: верхний слой мощностью около 0.5 м имеет сопротивление более 10 Ом·м, под ним расположен проводящий слой мощностью 1 м и сопротивлением около 2 Ом·м, подстилается слоем мощностью 1.5 м и удельным сопротивлением 10 Ом·м. Вся центральная и северная часть геоэлектрического разреза на глубине более 3–5 м представлена хорошо проводящими грунтами, которые имеют сопротивление менее 0.8 Ом·м, что указывает на высокую минерализацию подземных вод и их высокую температуру. Южная часть разреза представлена менее насыщенным флюидом, который формирует породы, имеющие

сопротивление более 1–2 Ом·м. И только проводящая линза грунтов в районе пикетов 27–36 мощностью около 1.5 м имеет сопротивление менее 1–0.8 Ом·м.

**3D модель верхней части гейзера Шаман по результатам площадной электротомографии.** По профилям 3–7 получены геоэлектрические разрезы до глубин 10–14 м (рис. 5). Расстояние между профилями составляет 5 м. Профили были ориентированы с запада на восток. Использовалась трехэлектродная комбинированная установка Шлюмберже  $Amn+mnV$  и малая коса длиной 47 м с шагом 1 м. Геоэлектрические разрезы имеют трехслойное строение. Верхний слой составляет небольшую террасу в западной части профилей имеет мощность около 1 м и представлен сравнительно высокоомными грунтами с сопротивлением более 30–35 Ом·м. Средний слой имеет сопротивление от 2 до 15 Ом·м на разрезах фиксируется также в западной части профиля и имеет мощность около 2–3 м. В его верхней части отмечается тонкий проводящий слой мощностью, вероятно, не более полуметра.



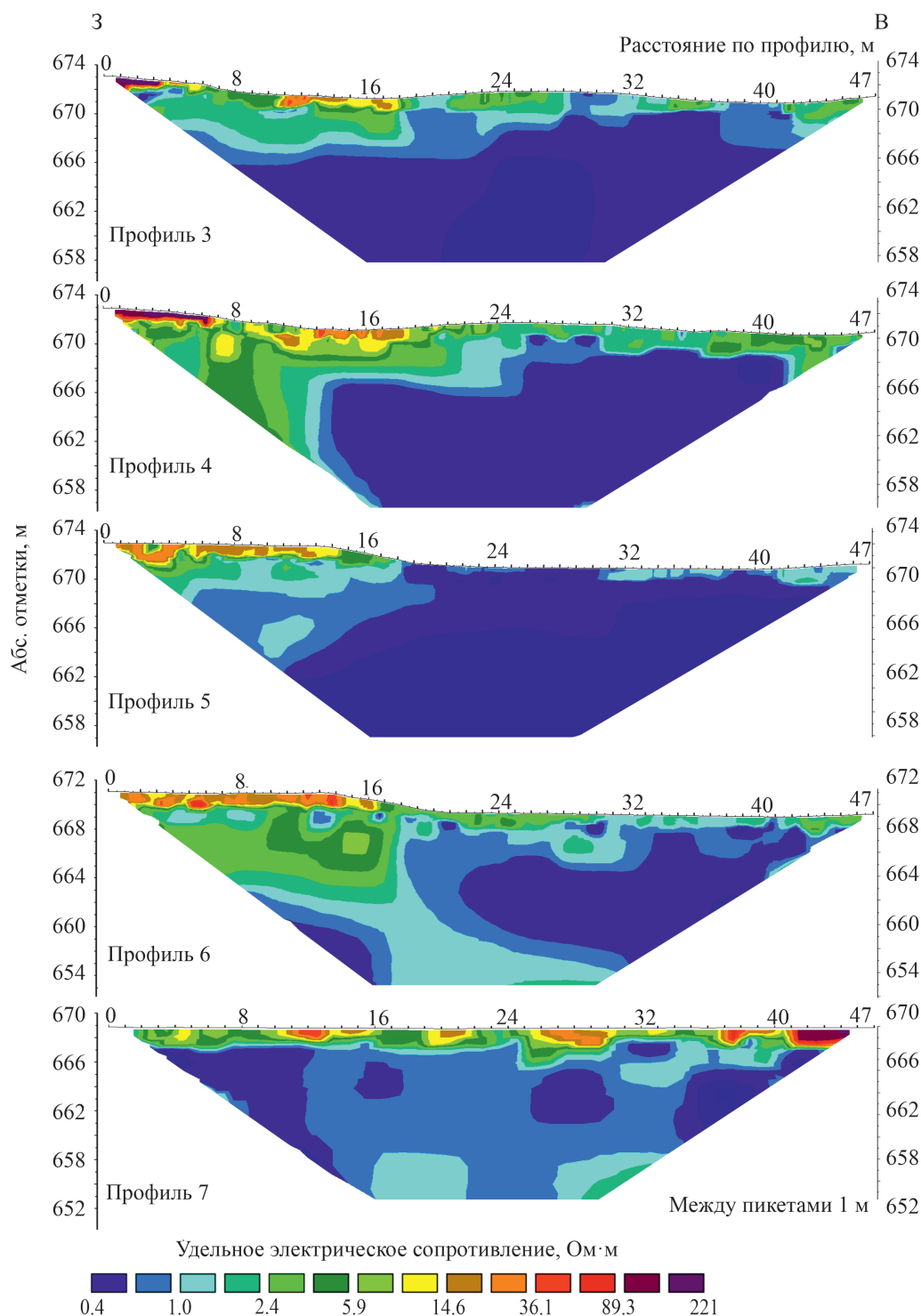
**Рис. 4.** Геоэлектрический разрез по результатам инверсии электротомографических данных по профилю 2. Разрез построен как средний по результатам мониторинговых наблюдений. Положение профиля приведено на рис. 2.

**Fig. 4.** Geoelectric section based on the results of inversion of electrotomographic data along profile 2. The section is built as an average according to the results of monitoring observations. The profile position is shown in fig. 2.

Большая часть представленных геоэлектрических разрезов сложена грунтами, которые имеют низкое удельное сопротивление менее 2 Ом·м, что указывает на высокую минерализацию грунтовых вод. В южной части участка на профилях 6 и 7 на глубине около 10 м также отмечается слой повышенного сопротивления. Таким образом,

область высокой проводимости с западной и южной стороны ограничена сравнительно более высокоомными грунтами.

Наиболее проводящая зона расположена по профилю 5, который проходит через жерло гейзера. Проводник имеет удельное сопротивление менее 1.2 Ом·м, а его кровля находится



**Рис. 5.** Геоэлектрические разрезы по результатам инверсии электротомографических данных по профилям 3-7. Профили 2 и 5 проходят через жерло Шамана. Положение профилей приведено на рис. 2.

**Fig. 5.** Geoelectric sections based on the results of inversion of electrotomographic data along profiles 3-7. Profiles 2 and 5 passes across the mouth of the Shaman geyser. The profiles position is shown in fig. 2.



на глубине около 4 м. Сопротивление этого объекта в другой поляризации электрического поля с севера на юг по профилю 2 имеет такую же величину. Это указывает на отсутствие электрической анизотропии вдоль разломов меридионального и широтного простирания, на пересечении которых расположен гейзер Шаман, то есть кавернозность и трещиноватость грунтов в верхней части разреза примерно одинаковая в двух главных направлениях.

Для оценки бокового влияния структур в центральной зоне была выполнена трехмерная инверсия электрического поля (рис. 6) в программе Res3DInv (Loke, 2012). Оказалось, что вся основная аномалия представлена в виде проводника, который располагается в центре участка. Диаметр аномалии около 30 м. Купол проводника приподнят вблизи жерла гейзера. Поверхность проводящей зоны бугристая, с амплитудой глубин от 1 до 4 м. В центре структуры рядом с местом, где находится жерло, проявилась аномальная зона с большим удельным электрическим сопротивлением диаметром около 5 м. Само жерло расположено в точке ПК24 на профиле 2 и ПК 24 на профиле 5 выделяется как локальный проводник. На профиле 2 и на профиле 5 мы наблюдаем локальный проводник диаметром около 2 м, который распространяется на глубину

до 4 м. Вероятно, в момент съемки подводящий канал был заполнен водой, которая у Шамана является существенно хлоридно-натриевой, имеет высокое содержание рудных элементов и примерно в 1.5 раза выше минерализации гидротерм Долины Гейзеров (Карпов, 2010). Поэтому электрическое сопротивление воды и соответственно грунтов имеет крайне низкое значение.

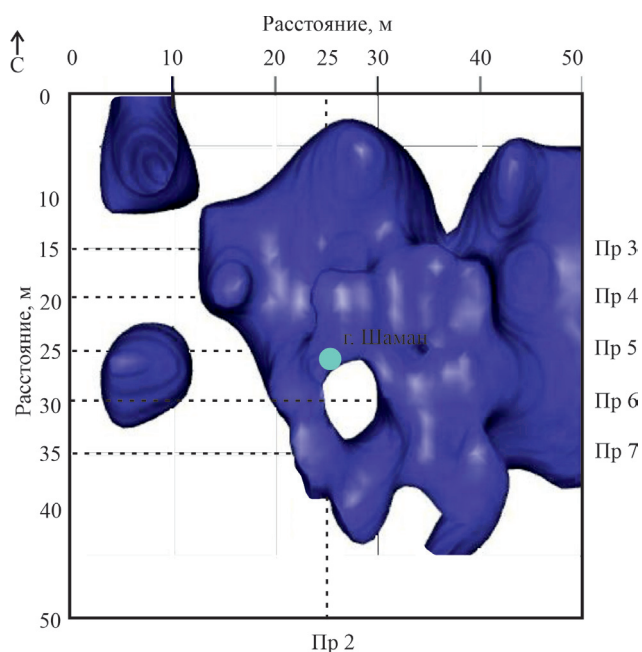
Однако стоит отметить, что результаты, полученные Г.А. Карповым (2010), по нашему мнению, соответствуют уже смешанным водам подземного и поверхностного происхождения. Тогда была получена суммарная минерализация примерно 3.5–3.7 г/л. Сопротивление грунтов по результатам электроразведки под жерлом Шамана составляет порядка 0.3–0.5 Ом·м, что должно соответствовать минерализации более 10 г/л (Электроразведка..., 1994). Поэтому вопрос о реальной минерализации грунтовых вод на глубине является открытым.

#### Электромониторинг с косой 5 м по профилю 1.

Результаты электромониторинга показаны в виде изменения аномалий удельного сопротивления во время одного цикла работы гейзера для большой косы при шаге 5 м (рис. 7). На представленных диаграммах из-за неустойчивости полученных результатов убраны края и нижняя часть геоэлектрических разрезов. Разрезы представлены до глубины 30 м. Начало измерений 17 августа 2020 г. в 16 часов 49 мин по местному камчатскому времени. Фонтанирование гейзера произошло в 17:03 и затем в 18:10. Эти данные представляют интерес т. к. показывают подготовку извержения и последующую гидрогеологическую перестройку в разрезе. Фонтанированию предшествует накопление большого количества флюида на глубине от 7 до 30 м. Эта ситуация четко выражена на разрезе 16:58. В течение этого временного интервала в районе ПК120 мы наблюдаем понижение удельного сопротивления, что связано с обводнением этой зоны. А во время фонтанирования и сразу после него сопротивление этой зоны резко возрастает, что указывает на превращение воды в пар.

После фонтанирования (разрезы 17:07 и 17:16) наблюдается освобождение пустот от флюида и появляется диаметром 10–12 м положительная аномалия в районе ПК120. На разрезе 17:16 наблюдается наиболее спокойная ситуация с небольшими отклонениями от среднего распределения электрического сопротивления. В этот момент на глубине формируются две проводящие зоны в районе ПК90 и ПК160 (рис. 7, разрез 17:34).

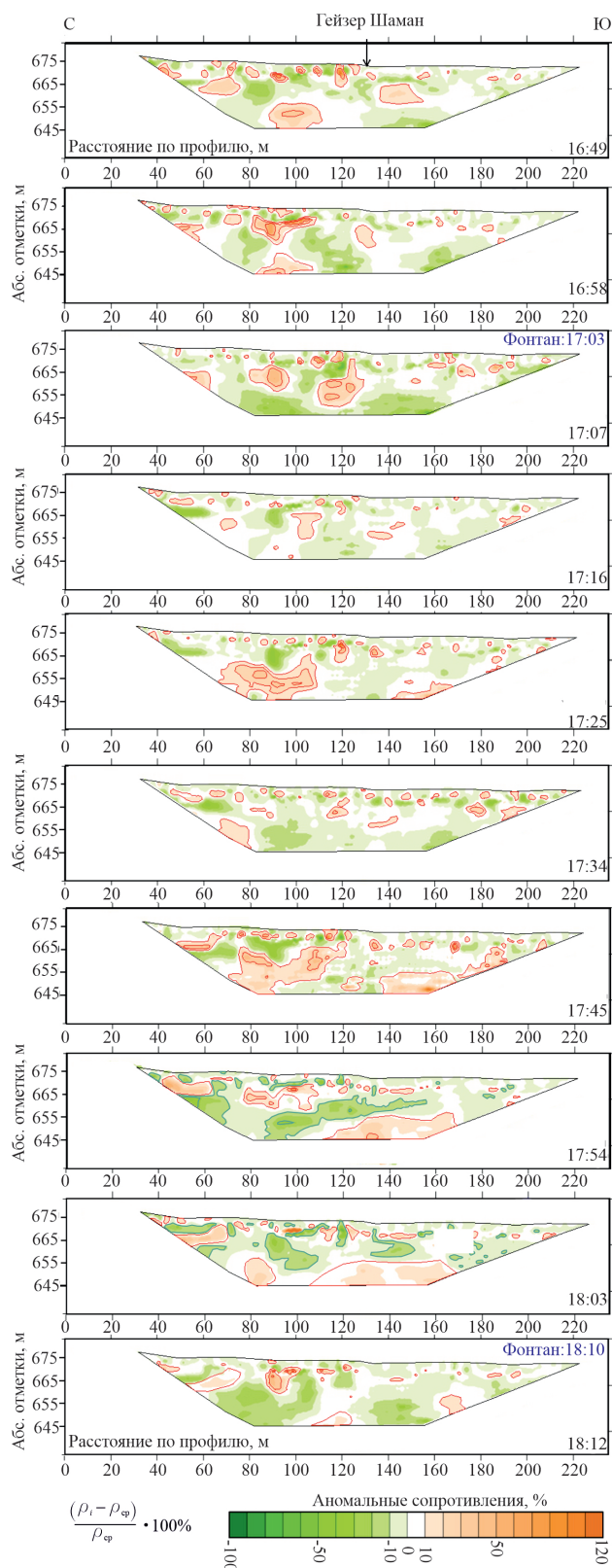
Затем на глубине в течение примерно получаса начинает проявляться очаг высокого сопротивления, а проводящий флюид постепенно оттесняется в верхнюю часть разреза. Наиболее ярко эта ситуация проявилась на разрезе 17:54.



**Рис. 6.** Объемная карта поверхности проводящего тела с сопротивлением менее 1.2 Ом·м как результат 3D- инверсии электрического поля над гейзером Шаман по профилям 2-7. Положение профилей приведено на рис. 2.

**Fig. 6.** Volumetric map of the surface of a conducting body with a resistivity of less than 1.2 Ohm·m as a result of a 3D inversion of the electric field over the Shaman geyser along profiles 2-7. The profile position is shown in fig. 2.





**Рис. 7.** Разностные геоэлектрические разрезы по результатам инверсии мониторинговых электротомографических данных по профилю 1. Положение профиля приведено на рис. 2.

**Fig. 7.** Difference geoelectric sections based on the results of monitoring electrotomographic data inversion along profile 1. The profile position is shown in fig. 2.

В это время происходит равномерное излияние из жерла горячей воды, которое через несколько минут переходит в стадию извержения.

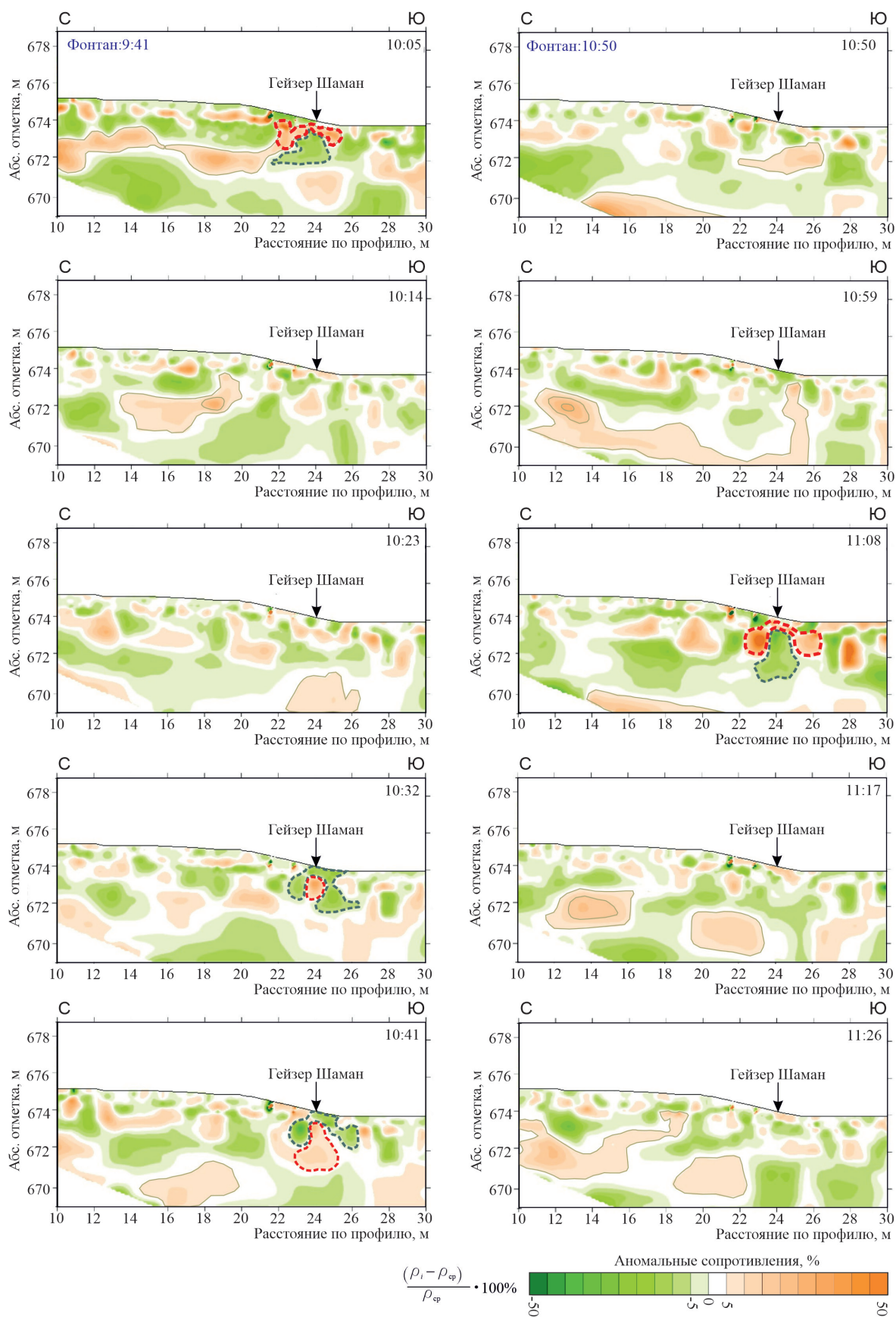
Обращает на себя внимание, что на глубине формируются достаточно большие аномальные зоны как положительного, так и отрицательного знака. Их размеры составляют более 20–30 м. В то же время вблизи поверхности образуется множество мелких аномалий размером не более 5–7 м.

**Электромониторинг с малой косой по профилю 2.** Для детального изучения процессов, которые происходят в верхней части разреза, был выполнен электрометрический мониторинг по профилю 2 с шагом между электродами 1 м (рис. 8). При этом средняя глубина исследования составила около 6 м. Неустойчивые элементы геоэлектрического разреза были убраны, поскольку результаты на больших разносах получены при минимальных соотношениях «полезный сигнал/шум». В результате выявлены следующие закономерности.

Во-первых, в течение семидесятиминутного цикла во время измерений происходит заметная перестройка геоэлектрического разреза. Электрические сопротивления в подавляющем большинстве случаев меняются в пределах  $\pm 10\%$ . Однако в некоторых аномальных зонах изменения достигают 15 и даже 20% от уровня фона. Аномальные разрезы на разных этапах гейзерного процесса могут принимать в целом инверсную структуру. Например, на разрезе, который был снят начиная с 10:05 наблюдается пять аномальных слоев: верхний проводящий слой имеет мощность 20–30 см; ниже расположен слой относительно высокого сопротивления мощностью 30–50 см; еще ниже расположен относительно проводящий слой мощностью около 1 м; четвертый слой сверху имеет повышенное сопротивление и мощность около 1.5 м; внизу на глубине около 3 м залегает проводник видимой мощностью более 1–2 м. Через 55 минут (разрез 10:59) ситуация меняется на противоположную: верхний слой имеет повышенное удельное сопротивление, второй слой имеет низкое сопротивление, третий слой — сравнительно высокое сопротивление; четвертый слой — низкое и внизу залегает слой высокого сопротивления. Такие изменения можно объяснить только переходом подземных вод в перегретое состояние и постепенное смещение пара и воды в разрезе под действием изменения давления и температуры.

Во-вторых, через 15–20 минут после фонтанирования (разрезы 10:05 и 11:08) происходит образование обширной проводящей структуры на абсолютных отметках 654–656 от 10 до 22 пикета. При этом непосредственно под гейзером формируется сложная структура, которая состоит из трех элементов: в центре на глубине от 1 до 2–3 м расположена изометричная

# ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В КАЛЬДЕРЕ УЗОН



**Рис. 8.** Разностные геоэлектрические разрезы по результатам инверсии мониторинговых электротомографических данных по профилю 2. Положение профиля приведено на рис. 2.

**Fig. 8.** Difference geoelectric sections based on the results of inversion of monitoring electrotomographic data along profile 2. The profile position is shown in fig. 2.

проводящая зона диаметром около 2 м, над ней на глубине от 0.5 до 1 м в виде выпуклой вверх дуги формируется зона повышенных сопротивлений, которая облегает сверху проводящую зону. Зона повышенного сопротивления, которая проявилась на глубине 3–4 м, по нашему мнению, является псевдоструктурой (артефакт инверсии).

В-третьих, перед началом фонтанирования, когда наблюдается стадия активного излияния воды из жерла происходит активное понижение сопротивления (разрезы 10:32 и 10:41), что указывает на достаточно сильное обводнение. А на глубине 1.5–2 м наблюдается изометричная высокоомная аномалия, которая указывает на образование области перегретого пара.

Изменения интегральной обводненности разреза во времени можно оценить как процентную долю площадей проводящих зон в разрезе, представленных на рис. 8. Результатом такой оценки служит диаграмма (рис. 9). Максимальная обводненность соответствует стадии наполнения, когда в верхнюю часть разреза поступает масса не очень горячей воды. Затем эта вода начинает превращаться в пар. Фонтанирование происходит в момент максимального превращения горячей воды в пар, когда пик давления приводит, по существу, к взрыву и мгновенному выведению воды из жерла, которое происходит после сброса определенной порции флюида, когда критическое давление и температура мгновенно переводит огромные объемы воды в парообразное состояние, что позволяет вытолкнуть остатки воды на поверхность земли. После этого события обводненность разреза во время парения остается на сравнительно низком

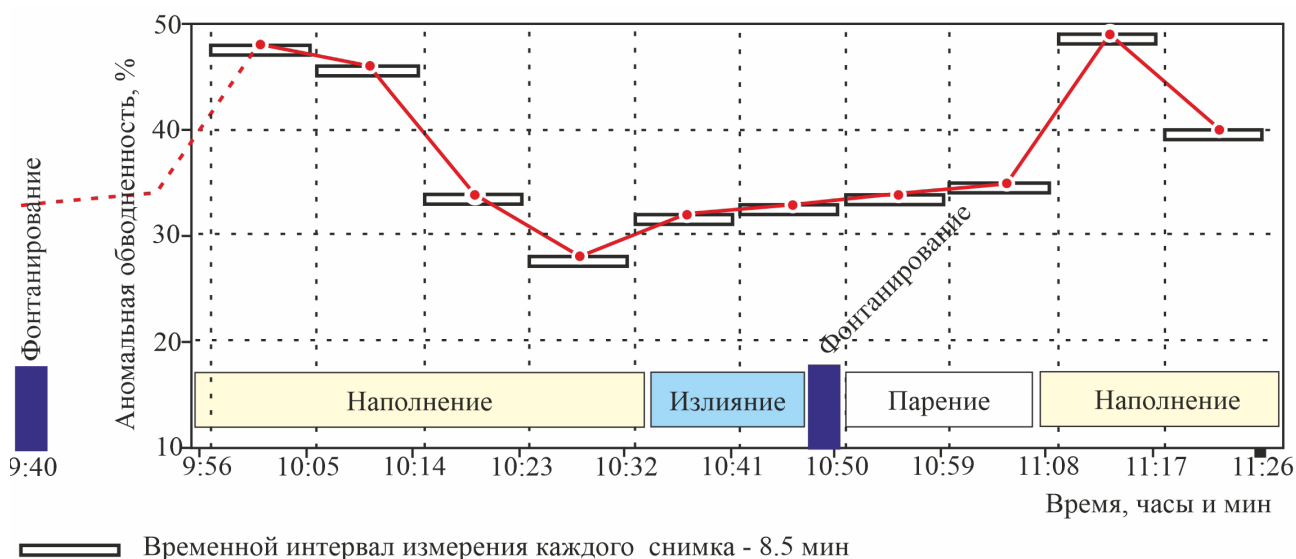
уровне в относительных единицах 32%. Затем в течение примерно получаса наблюдается медленный процесс повышения обводненности, который на поверхности земли визуальным образом соответствует стадии наполнения или спокойного состояния гейзера. Таким образом, изменения удельных сопротивлений в геоэлектрическом разрезе достаточно хорошо объясняют явления, происходящие на поверхности земли.

## ВЫВОДЫ

Механизм работы гейзера Шаман на момент проведения наших исследований (середина августа 2020 года) проходит все четыре классические стадии развития гейзера: наполнение, излияние, фонтанирование и парение. При этом стадия наполнения происходит в течение 30 минут, стадия излияния около 20 минут, фонтанирование продолжается 2–3 минуты и стадия парения происходит в течение 15–17 минут.

Геоэлектрический разрез через гейзер Шаман на глубину до 60 м можно разделить на три части. Центральная часть представлена очень сильным проводником, который соответствует горячей зоне Восточного Термального поля. Фланги разреза представлены высокоомными грунтами, что вероятно соответствует холодной зоне. Между холодной и горячей зонами располагается теплая зона с промежуточными сопротивлениями грунтов.

Стадия наполнения соответствует максимальной обводненности верхней части разреза. Излияние, фонтанирование и парение происходит при минимальной обводненности, что



**Рис. 9.** Изменение обводненности во времени разреза по профилю 2. Положение профиля показано на рис. 2.

**Fig. 9.** The change in water content over the time of the section according to profile 2. The profile position is shown in fig. 2.



выражается в превалировании аномалий высокого сопротивления.

На стадии излияния на глубине около 20 м формируется обширная положительная аномалия, которая соответствует перегретому пару. Над этой зоной на глубине 10–15 м образуется проводящая аномалия, которая соответствует обводненному горизонту с горизонтальными размерами около 70 м.

По результатам трехмерной инверсии, зона, примыкающая к гейзеру, является сильнопроводящей, центральная её часть характеризуется сопротивлениями менее 1.2 Ом·м, что указывает на высокую степень минерализации воды, насыщающей эту зону. В центре этой зоны наблюдается относительно высокоомный канал, предположительно являющийся подводящим к гейзеру.

#### Список литературы [References]

- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.* Как устроены гейзеры и почему их много в Долине Гейзеров? // Труды Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2014. Вып. 3. С. 142–151 [*Belousov A.B., Belousova M.G.* How are geysers arranged and why are there many of them in the Valley of Geysers? / Proceedings of the Kronotsky State Natural Biosphere Reserve. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 2014. Iss. 3. P. 142–151 (in Russian)].
- Белоусов В.И., Гриб Е.Н., Леонов В.Л.* Геологические позиции гидротермальных систем Долины Гейзеров и кальдеры Узон // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 1–11 [*Belousov V.I., Grib E.N., Leonov V.L.* Geological positions of hydrothermal systems of the Valley of Geysers and the Uzon caldera // Volcanology and seismology. 1983. № 1. P. 1–11 (in Russian)].
- Брайцева О.А., Богоявленская Г.Е., Эрлих Э.И.* Геологическое строение Узонско-Гейзерной депрессии // Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. М.: Недра, 1974. С. 10–32 [*Braitseva O.A., Bogoyavlenskaya G.E., Erlih E.I.* Geological structure of the Uzon-Geyser depression / Volcanism, hydrothermal process, and ore formation. Moscow: Nedra, 1974. P. 10–32 (in Russian)].
- Брайцева О.А., Флоренский И.В., Волинец О.И.* Вулкан Кихпинич. Действующие вулканы Камчатки. В 2-х томах. Т. 2 / Отв. ред. Федотов С.А., Масуренков Ю.П. 1991. М.: Наука, С. 74–93 [*Braitseva O.A., Florenskii I.V., Volinets O.I.* Volcano Kikhpinych. Active Volcanoes of Kamchatka. In 2 vol. V. 2 / Eds. by Fedotov S.A., Masurenkov Yu.P. 1991. Moscow: Nauka. P. 74–93 (in Russian)].
- Влодавец В.И., Пуйн Б.И.* Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюллетень вулканологических станций. 1957. № 25. С. 5–95 [*Vlodavec V.I., Piip B.I.* Catalog of active volcanoes in Kamchatka / Bulletin of Volcanological Stations. № 25. P. 5–95 (in Russian)].
- 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 [*Dvigalo V.N., Melekestsev I.V.* Geological and geomorphological consequences of catastrophic landslide and rockslide-landslide processes in the Kamchatka Valley of Geysers (according to aerial photogrammetry) / Volcanology and seismology. 2009. No. 5. P. 24–37 (in Russian)].
- Камчатка. Курильские и Командорские острова / Под. ред. Лучицкого И.В. М.: Наука, 1974. 440 с. [Kamchatka. Kuril and Commander Islands / Ed. Luchitsky I.V. Moscow: Nauka, 1974. 440 p. (in Russian)].
- Карпов Г.А.* Новый гейзер в Кроноцком заповеднике. Характеристика и причины возникновения // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский. 2010. С. 1–8 [*Karpov G.A.* A new geyser in the Kronotsky Reserve. Characteristics and causes of occurrence / Proceedings of the conference dedicated to the Volcanologist's Day. Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS. Petropavlovsk-Kamchatsky. 2010. P. 1–8 (in Russian)].
- Леонов А.В.* Каталог гейзеров Кроноцкого заповедника. Долина гейзеров и кальдера Узон: история и современность. М.: Изд-во ООО «Реарт», 2017. 384 с. [*Leonov A.V.* Catalog of geysers of the Kronotsky Reserve. Valley of Geysers and Uzon Caldera: history and modernity. Moscow: «Reart», 2017. 401 p. (in Russian)].
- Леонов В.Л.* Структурные условия локализации высоко-температурных гидротерм. Москва: Наука, 1989. 105 с. [*Leonov V.L.* Structural conditions for the localization of high-temperature fluids / Moscow: Nauka, 1989. 105 p. (in Russian)].
- Леонов В.Л., Гриб Е.И.* Кальдеры и игнимбриты Узон-Семячинского района, Камчатка: новые данные по результатам изучения разрезов плато Широкое // Вулканология и сейсмология. 1998. № 3. С. 41–59 [*Leonov V.L., Grib E.I.* Calderas and ignimbrites of Uzon-Semyachinsky region, Kamchatka: new evidence from a study of sections in the Shirokoe plateau / Volcanology and seismology. 1998. № 3. P. 41–59 (in Russian)].
- Леонов В.Л., Гриб Е.И., Карпов Г.А. и др.* Кальдера Узон и Долина Гейзеров. Действующие вулканы Камчатки. Действующие вулканы Камчатки. В 2-х томах. Т. 2 / Отв. ред. Федотов С.А., Масуренков Ю.П. 1991. М.: Наука. С. 94–141 [*Leonov V.L., Grib E.I., Karpov G.A. et al.* Active Volcanoes of Kamchatka. In 2 vol. V. 2 / Eds. by Fedotov S.A., Masurenkov Yu.P. 1991. Moscow: Nauka. P. 94–141 (in Russian)].
- Масуренков Ю.П.* Структурная позиция Карымского вулканического центра // Вулканический центр: строение, динамика, вещество (Карымская структура) / Отв. ред. Масуренков Ю.П. М.: Наука, 1980. С. 111–116 [*Masurenkov Yu.P.* Structural position of the Karymsky volcanic center / Volcanic center: structure, dynamics, substance (Karymskaya structure) / Ed. by Masurenkov Yu.P. Moscow: Nauka. 1980. P. 111–116 (in Russian)].
- Мелекесцев И.В.* О сейсмостектонических обвалах и оползнях на Камчатке // Вопросы географии Камчатки. 1965. № 3. С. 107–108 [*Melekestsev I.V.* About



- seismotectonic rockslides and landslides in Kamchatka / Questions of Kamchatka geography. 1965. № 3. P. 107–108 (in Russian)].
- Мелекесцев И.В., Двигало В.И., Кирьянов В.Ю. и др. Вулкан Эбеко (Курильские острова): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Ч. II. // Вулканология и сейсмология. 1993. № 4. С. 24–42 [Melekestsev I.V., Dvigalo V.I., Kiryanov V.Yu. et al. Ebeko Volcano (Kuril Islands): history of eruptive activity and future volcanic danger. Pt. II / Volcanology and seismology. 1993. № 4. P. 24–42 (in Russian)].
- Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дроздин В.А. и др. Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестник ДВО РАН. Владивосток: ДВО РАН. 2008. № 1. С. 33–44 [Pinegina T.K., Delmen I.F., Drozdin V.A. et al. Kamchatka Valley of Geysers after the catastrophe on 3 June 2007 / Vestnik FEB RAS. Vladivostok: FEB RAS. 2008. № 1. P. 33–44 (in Russian)].
- Солоненко В.П., Хромовских В.С., Павлов О.В. и др. Сейсмоструктура и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья. М.: Наука, 1968. 211 С. [Solonenko V.P., Hromovskih V.S., Pavlov O.V. et al. Seismotectonics and seismicity of the rift system of the Baikal region. Moscow: Nauka, 1968. 211 p. (in Russian)].
- Сугрובה И.Г., Сугробов В.М. Изменения режима теплопроявлений Долины Гейзеров под влиянием циклона Эльза // Вопросы географии Камчатки. 1985. № 9. С. 88–94 [Sugrobova I.G., Sugrobov V.M. Changes in the regime of thermal manifestations of the Valley of geysers under the influence of cyclone Elsa / Questions of Kamchatka geography. 1985. № 9. P. 88–94].
- Сугробов В.М., Сугрובה И.Г., Дроздин В.А. и др. Жемчужина Камчатки — Долина гейзеров. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс. 2009. 108 с. [Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Drozdin V.A. et al. The pearl of Kamchatka — Valley of Geysers / Prtopavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress. 2009. 108 p. (in Russian)].
- Флоренский И.В. К вопросу о возрасте кальдер Узон и Крашенинникова // Вулканология и сейсмология. 1984. № 1. С. 102–106 [Florenskii I.V. On the question of the age of Uzon and Krasheninnikov Calderas // Volcanology and seismology. 1984. № 1. P. 102–106 (in Russian)].
- Электроразведка методом сопротивлений / Под ред. Хмелевского В.К. и Шевнина В.А.: учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1994. 160 с. [Resistivity method in electrical prospecting/ Edited by Hmelevskoy V.K. and Shevnin V.A.: study guide. Moscow: Publishing House of MSU. 1994. 160 p. (in Russian)].
- Bunsen R.W. Physikalische Beobachtungen uber die hauptsachlichsten Geysir Islands // Annalen der Physik und Chemie. 1847. V. 83. P. 159–170.
- Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. 1996. V. 44. P. 131–152.
- Loke M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys [Electronic resource] // M.H. Loke. 2012. 148 p. URL: [www.geotomo.com](http://www.geotomo.com)
- Wentrop C. Bunsen the Geochemist: Icelandic Volcanism, Geyser Theory, and Gas, Rock and Mineral Analyses // Angewandte Chemie International Edition. 2021. V. 60. Iss. 3. P. 1066–1081. <https://doi.org/10.1002/anie.202008727>

## ELECTROTOMOGRAPHIC STUDIES IN THE UZON CALDERA AT SHAMAN GEYSER (KAMCHATKA PENINSULA)

I.N. Modin, A.D. Skobelev, A.M. Valiulina, V.S. Stepchenkov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, 119991;  
e-mail: imodin@yandex.ru

Received April 28, 2023; revised August 28, 2023; accepted December 25, 2023

In 2020, in the caldera of Uzon volcano (Kamchatka Peninsula), electrical prospecting studies were carried out using the electrotomography method within the eastern thermal field near Shaman geyser. The geoelectric section is divided into three zones according to the level of electrical resistivity: relatively high-resistivity "cold" at the edges and relatively low resistivity «hot» in the center. The section of the "hot" zone, within which the Shaman geyser is located, is distinguished by anomalously low resistivity (less than 0.5 Ohm·m) at a depth of 5 to 20 m, which indicates the highest fracturing and fluid saturation of rocks in this location. Electrical monitoring was carried out above the geyser using the Omega-48 electrical tomography station and two cables 235 m and 47 m long. The first cable provided a survey depth of 60 m, the second one about 12 m. On the difference geoelectric sections based on the results of monitoring, four phases of the geyser operation are distinguished: filling, outpouring, spouting and steaming in the form of alternation of positive and negative anomalies of the electric field. Based on the results of areal measurements, it was possible to identify the channel channel to the geyser.

**Keywords:** Kamchatka peninsula, Uzon caldera, geyser, electrical resistivity tomography, electrical monitoring.