Оригинальная статья / Original article
УДК 550.83
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-36-48

Поиски гидрогеотермальных резервуаров геофизическими методами в Монголо-Байкальском регионе

© П.С. Бадминов[a], Д. Сурмаажав[b], А.Ю. Ескин[c], М.С. Шкиря[d]
[a,c]Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия
[b]Корпорация «Монгол Ус», г. Улан-Батор, Монголия
[d]Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель данного исследования заключается в изучении возможности поисков гидрогеотермальных резервуаров в Монголо-Байкальском регионе геофизическими методами. Для достижения поставленной цели использованы следующие методы: метод зондирования становлением поля в ближней зоне, метод вертикального электромагнитного зондирования и метод вызванной поляризации. Эти методы хорошо зарекомендовали себя при выделении объектов с контрастными удельными сопротивлениями на различных глубинах. Причиной низких сопротивлений (5–10 Ом·м) твердых пород могут служить трещиноватые зоны, насыщенные высокотемпературными минерализованными растворами (гидротермальные резервуары). В результате проведенных наземных геофизических исследований на эталонном (месторождение гидротерм Шивэрт Архангайского аймака Монголии) и на прогнозном участке вблизи вулкана Сангийн-Толгой в 7–8 км от аймачного центра г. Цэцэрлэг на различных глубинах выявлены гидрогеотермальные резервуары, изолированные от дневной поверхности. Гидротермы месторождения Шивэрт с температурой 67 °С выведены на поверхность неглубокими скважинами до 78 м. На прогнозном участке, расположенном в пределах внутреннего прогиба Хангайского синклинория, глубина залегания гидрогеотермального резервуара – до 700 м и глубже. Пробуренная на этом участке скважина глубиной 450 м вывела на поверхность напорные субтермальные воды с температурой до 16 °С, несмотря на приток холодных вод в нижнем 100-метровом интервале. Также произведена оценка теплового состояния подземной гидросферы Хангайского сводового поднятия по данным о химическом составе более чем 20 термальных источников с помощью гидрогеохимических геотермометров. Высокие температуры подземной гидросферы Хангайского сводового поднятия, связанные с магматогенной термоаномалией, представляют огромный практический интерес. Термальные воды Монголо-Байкальского региона сосредоточены в термовыводящих зонах разломов и при наличии перекрывающих осадочных отложений не всегда имеют выход на дневную поверхность. Геофизические методы вполне могут быть использованы для поисков таких гидрогеотермальных резервуаров.

Ключевые слова: гидрогеотермальные резервуары, термальные воды, геоэлектрический разрез, зоны минерализованных растворов, гидрогеохимические геотермометры

Информация о статье: Дата поступления 10 января 2020 г.; дата принятия к печати 11 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Бадминов П.С., Сурмаажав Д., Ескин А.Ю., Шкиря М.С. Поиски гидрогеотермальных резервуаров геофизическими методами в Монголо-Байкальском регионе. *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 1. С. 36–48. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-36-48

Exploration for hydrothermal geological reservoirs by geophysical methods in the Mongol-Baikal region

© Prokopii S. Badminov[a], Damdin Surmaajav[b], Alexander Yu. Eskin[c], Mikhail S. Shkirya[d]
[a,c]Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia
[b]“Mongol Us” Corporation, Ulan Bator, Mongolia
[d]Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The paper presents the study on the prospects of the exploration for hydrothermal geological reservoirs in the Mongol-Baikal region using geophysical methods. For the purpose of the study, the following methods have been used: transient electromagnetic sounding, vertical electromagnetic sounding, and induced polarization method. The above methods have proved effective in the selecting the objects with contrast resistivity at various depths. The low resistance (5–10 Om·m) of the hard rock can be caused by the presence of fractured zones with

high-temperature mineralized solutions, i.e hydrothermal reservoirs. As a result of the surface geophysical studies carried out at different depths at the reference site (Shivert hydrotherm deposit, Arkhangai aimak, Mongolia) and at the prospective site in the vicinity of Sangiyin-Tolgoi volcano (7–8 km from the regional center Tsetserlag), hydrothermal geological reservoirs isolated from the day surface have been identified. The Shivert hydrothermal deposits with a temperature of 67 °C have been brought to the surface with shallow boreholes up to 78 m deep. At the prospective site located within the internal deflection of the Khangai synclinorium, the hydrothermal geological reservoir is at a depth of over 700 m. A 400 m deep borehole drilled in this section brought the pressure water with a temperature of up to 16 ºC to the surface in spite of the cold water influx in the lower 100-meter interval. The thermal state of the underground hydrosphere of the Khangai arch uplift has been estimated using hydrogeochemical geothermometers, based on the chemical composition of more than 20 thermal sources. The underground hydrosphere of the Khangai arch uplift with its high temperatures associated with magmatogene thermal anomaly is of great practical interest. The thermal waters of the Mongol-Baikal region are concentrated in the thermal effluent fault zones and in the presence of overlapping sedimentary deposits, do not always make their way to the day surface. The above geophysical methods are suitable for the exploration for such hydrothermal reservoirs.

Keywords: hydrothermal geological resources, thermal waters, geoelectric section, mineralized-solution zones, hydrogeochemical geothermometers

Information about the article: Received January 10, 2020; accepted for publication February 11, 2020; available online March 30, 2020.

For citation: Badminov PS, Surmaajav D, Eskin AYu, Shkirya MS. Exploration for hydrothermal geological reservoirs by geophysical methods in the Mongol-Baikal region. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(1):36–48. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-36-48

Введение

Гидрогеотермальная энергия (тепло земных недр) является экологически чистым возобновляемым ресурсом. Одно из его огромных преимуществ – это доступность. Постоянный поток тепла Земли обеспечивает неисчерпаемый источник энергии [1]. Монголо-Байкальский регион, особенно восточный сегмент Хангайского сводового поднятия, чрезвычайно богат термальными водами и представлен многочисленными источниками с температурами на выходе от 30 до 92 °C [2]. В мировой практике такие источники гидрогеотермальной энергии считаются низкопотенциальными и используются в целях тепло- и водоснабжения. Однако в последнее время появились установки с бинарными схемами (в качестве теплоносителя используются низкокипящие жидкости), позволяющие вырабатывать электроэнергию при температурах источников 80–90 °C, а бурение глубоких скважин позволяет поднять температуру природного теплоносителя свыше 100 °C.

Одной из слабых сторон использования гидрогеотермальной энергии считается отдаленность источников от конечного потребителя при том, что транспортировка теплоносителя экономически нецелесообразна. Поэтому поиски гидрогеотермальных резервуаров на доступных для бурения глубинах, способных вывести на поверхность высокотемпературные термальные воды, становятся актуальными, особенно в районах, испытывающих острый дефицит электроэнергии.

Специальные исследования для поисков гидрогеотермальных резервуаров в Монголо-Байкальском регионе до сих пор не проводились. Это было связано в первую очередь с вектором экономического развития, направленным на использование традиционных источников энергии. Тем не менее на побережье оз. Байкал на небольших глубинах от 120 до 278 м буровыми скважинами были вскрыты термальные воды, не имевшие до этого выходов на дневную поверхность, однако условия их формирования и распространения были неизвестны. В последние годы нарастающий дефицит органических видов топлива и жесткие экологические требования заставляют обращать все большее внимание на альтернативные источники энергии, наиболее перспективным из которых является гидрогеотермальная энергия, так как она считается одним из самых надежных видов возобновляемой энергии.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим краткую геологическую характеристику района исследования и предпосылки существования скрытых гидрогеотермальных резервуаров. Район исследований охватывает центральную часть Монголии в пределах Хангайского сводового поднятия и территориально расположен в пределах Архангайского аймака (рис. 1). Предпосылками существования скрытых гидрогеотермальных резервуаров в районе аймачного центра г. Цэцэрлэг является его близость к месторождениям гидротерм Шивэрт, Цэнхэр (20–30 км) и месторождению субтерм Хуйтен, окружающих со всех сторон долину р. Урд-Тамир с предположительно единым источником тепла и механизмом теплопередачи. Локальные тепловые аномалии, часто совпадающие с зонами разгрузки гидротерм, обусловлены в основном тектонической активизацией и конвективным выносом тепла из наиболее проницаемых и подвижных участков в верхних горизонтах земной коры. Такие участки наиболее перспективны для получения и использования гидрогеотермальной энергии [3]. Гидротермальная активность и высокий тепловой потенциал земных недр Центральной Монголии связаны с вулканической деятельностью и ее пространственно-временной эволюцией, явившейся следствием коллизионного сжатия со стороны Индийского индентера и образования ослабленных мантийных зон. В долине р. Урд-Тамир в непосредственной близости от города существуют вулканические постройки миоценового возраста, а в смежном бассейне р. Орхон получил пространственное обособление Верхне-Орхонский ареал четвертичной вулканической деятельности. Мантия под этим ареалом должна быть наиболее высокотемпературной и остается потенциально способной к магмогенерации [4, 5]. Очаги магмогенерации также дали начало многофазным плутонам, которые в процессе внедрения и кристаллизации сформировали сложную многофазную структуру Хангайского гранитоидного батолита [6, 7]. Кроме того, плотность кондуктивного теплового потока *q*, оцененная по изотопному составу гелия, в термальных источниках Хангая превышает нормальный фоновый уровень для палеозойской коры и свидетельствует о более позднем, дополнительном поступлении в нее гелия из мантии [8].

Основу геологического разреза исследуемой территории составляют осадочно-метаморфические породы среднего палеозоя, прорванные герцинскими интрузиями, наиболее широко распространенными в Монголии, а также кайнозойские эффузивы [9]. Среднепалеозойские отложения представлены главным образом песчаниками, кремнистыми, глинистыми и реже кристаллическими сланцами, конгломератами, известняками, кварцитами, филлитами, спилитами. В отложениях континентальных фаций к этим породам добавляются еще углисто-глинистые сланцы. Герцинские интрузии представлены порфировидными биотитовыми и биотит-роговообманковыми гранитами, составляющими обычно срединные их части; в краевых частях интрузий наблюдаются гранодиориты, кварцевые сиениты, граносиениты, диориты, являющиеся продуктами дифференциации крупных гранитных интрузий. Кайнозойские эффузивные образования представлены преимущественно базальтами крупного Тамирского сегмента позднекайнозойских вулканических извержений. Цэцэрлэгское вулканическое поле занимает площадь около 4500 км^2. Вулканические останцы располагаются преимущественно на вершинах горных отрогов, но в тектонически опущенных блоках обнажены на уровне тальвегов речных долин. Юго-восточнее г. Цэцэрлэг базальты находятся в долине р. Урд-Тамир. Сама межгорная Урд-Тамирская впадина сложена песками, песчаниками, конгломератами, гравелитами, глинами третичного возраста.

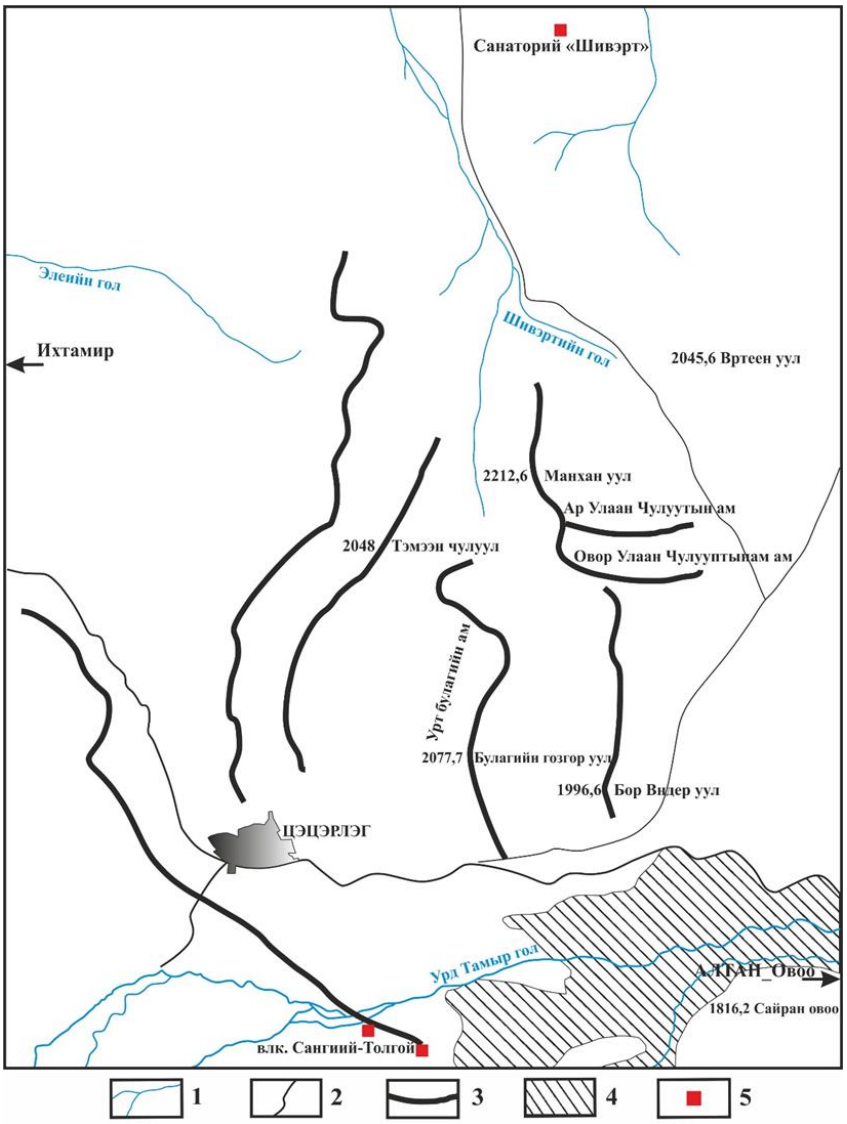

Рис. 1. Схема района геофизических исследований:
1 – реки; 2 – дороги; 3 – горные хребты; 4 – заболоченные участки; 5 – геофизические полигоны
Fig. 1. Scheme of the geophysical research area:
1 – rivers; 2 – roads; 3 – mountain ranges; 4 – wetlands; 5 – geophysical ranges

На данный момент, на наш взгляд, существует два метода, позволяющих вести поиски гидрогеотермальных резервуаров в Монголо-Байкальском регионе. Первый – пассивная сейсмотомография, второй – электроразведка. Первый метод, изначально появившийся в сейсмологии и инженерных изысканиях (микросейсмика), ныне является крайне перспективным для прослеживания путей миграции жидкостей (воды, нефти) и газов (углеводорода, пара), контроля за изменением проницаемости ослабленных зон. Метод основан на изучении микроземлетрясений, происходящих как при формировании трещин и микроразломов под влиянием гидравлического давления, так и при шумах, связанных непосредственно с движением флюидов по трещинам. Метод требует организации сети наблюдений и регистрации естественных шумов горного массива, а также достаточно сложной математической обработки и интерпретации полученных сигналов [10]. Методы электроразведки, в частности метод зондирования становлением поля в ближней зоне и метод вызванной поляризации, использовались ранее для обнаружения залежей углеводородов, рудных тел и

являются эффективными при выделении объектов с контрастными удельными сопротивлениями. Известно, что удельное сопротивление в сильной степени зависит от температуры породы и минерализации насыщающих его растворов [11]. Геофизические исследования, проведенные на месторождениях гидротерм Шивэрт (Монголия), Сухая (Россия), показывают, что причиной низких сопротивлений (5–10 Ом·м) твердых пород служат трещиноватые зоны, насыщенные высокотемпературными минерализованными растворами (гидротермальные резервуары), которые на поверхности земли маркируются термальными скважинами и источниками [12]. В данном регионе гидротермы имеют повышенную минерализацию по сравнению с подземными водами в скважинах, родниках, колодцах [13]. Континентальные пресноводные отложения не имеют в своем разрезе галогенных формаций, характерных для осадочных пород морских бассейнов, и седиментационные воды даже в застойных условиях могут оставаться пресными. Если осадочные отложения невелики или отсутствуют вовсе (Шивэрт, Цэнхэр, Хуйтен в Моголии), то термальные воды выходят на поверхность, а если они достаточно мощные (200–300 м), то надежно изолируют гидротермальные резервуары, которые могут быть вскрыты буровыми скважинами (Сухая, Большая Речка, Энхалук в России).

Для получения сведений о тепловом состоянии подземной гидросферы Хангайского сводового поднятия проведено газово-геохимическое и температурное опробование более 20 минеральных источников. Температурные замеры не всегда позволяют определить причины наблюдаемых термоаномалий – определить влияние экзогенных и эндогенных факторов [14]. Оценить роль последних можно, привлекая данные о температурных условиях формирования химического состава вод в пласте. Температуры формирования воды в пласте можно оценить косвенными методами, используя гидрогеохимические геотермометры [15–17]. Для расчетов нами использован кремниевый геотермометр, показавший удовлетворительные результаты при определении «базовых температур» азотных терм Байкальской рифтовой зоны [18].

Результаты исследования и их обсуждение

Соотношения содержания двуокиси кремния в воде термальных минеральных источников Хангая с температурой источников ложатся на кривую растворимости *α*-кристобалита. Соответственно, оценки расчетных температур произведены по формуле Фурнье – Трусделла для низкотемпературных систем ($T_{пов.} < T_{кип.}$) (таблица):

$$T_{гл.} = \frac{1051,1}{4,655 - lgSiO_2} - 273,15,$$

где $T_{гл.}$ – температура источника на глубине его формирования; SiO_2 – содержание двуокиси кремния.

Значения глубинных температур и средний геотермический градиент γ = 25 °С/км, принятый для данного региона [19], позволяют оценить глубину формирования гидротерм. Они находятся в пределах 1,53–5,37 км. Термальные воды, сосредоточенные в зонах термовыводящих разломов, при наличии перекрывающих осадочных отложений могут не иметь выхода на поверхность и формировать на небольших глубинах вторичные гидротермальные резервуары со своими подводящими каналами.

Для поисков таких гидрогеотермальных резервуаров были проведены наземные геофизические исследования на территории Архангайского аймака Монгольской Народной Республики методом зондирования становлением поля в ближней зоне в варианте метода переходных процессов, методом вызванной поляризации, также использована технология вертикальных электромагнитных зондирований. Совместное применение этих методов обеспечивает максимальную информативность и надежность полученных результатов. Геофизические работы проведены на эталонном

Прогнозные температуры глубинных вод по кремниевому геотермометру в низкотемпературных ($T_{пов.}$ < $T_{кип.}$) системах Хангая
Deep water temperature estimated by a silicon geo-thermometer in the low-temperature Khangai systems ($T_{пов.}$ < $T_{кип.}$)

Источник	$T_{пов.}$, ˚C	H_4SiO_4, мг/л	SiO_2, мг/л	$T_{гл.}$,˚C прогнозн.	$H_{форм.}$, км = $T_{гл.}$ / γ
Шивэрт	57	145,5	97	120,8	4,83
Хуйтэн-Аршан	12,5	131,07	87,38	114,1	4,56
Цэнхэр	84	178,57	119,05	134,4	5,37
Бор тал	52	98,05	65,37	97	3,88
Гялгар	52	121,95	81,3	109,8	4,39
Цаган-Сум	69,1	133	88,7	115,1	4,61
Ганц мод	4	28,57	19,05	38,3	1,53
Цац	5	8	5,33	–	–
Могод	57	104	69,36	100,4	4,01
Хануй	3	54	36,01	66	2,64
Хан-Ундэр	2,6	44	29,34	56,6	2,26
Мухар-Хужирт	3,2	33	22,01	44,2	1,77
Бэлхийн	5,4	35	23,34	46,6	1,86
Ангархай	0,8	34	22,67	45,4	1,81
Чулуут	45,2	100	66,69	98,1	3,93
Улан-Урэг	13,5	57	38,01	68,7	2,75
Ноён-хангай	36,4	130	86,7	113,7	4,55
Шаргалжут	88	154	102,7	124,5	4,98
Хужирт	47	144	96,04	120,1	4,8
Хурэмт	55,5	133	88,7	115,1	4,61
Уртын тохой	10,5	74,1	49,42	81,8	3,27

Примечание: $T_{пов.}$ – температура источника на поверхности земли; $T_{кип.}$ – температура кипения воды; $T_{гл.}$ – температура источника на глубине его формирования; $H_{форм.}$ – глубина формирования источника; γ – средний геотермический градиент.

Note: $T_{пов.}$ – surface temperature of the source; $T_{кип.}$ – boiling point of water; $T_{гл.}$ – source temperature at the depth of its formation; $H_{форм.}$ – source formation depth; γ – average geothermal gradient.

(месторождение гидротерм Шивэрт) и на прогнозном участке вблизи вулкана Сангийн-Толгой. Сеть профилей и точек наблюдений разбивалась с помощью GPS-навигаторов таким образом, чтобы подсечь возможный переток термальных вод по долине р. Шивэртийн-Гол в Урд-Тамирскую впадину, а также обнаружить их возможную дислокацию в районе вулкана Сангийн-Толгой (см. рис. 1).

На эталонном участке низкоомные объекты со значениями удельных электрических сопротивлений 1–10 Ом·м маркируются на поверхности термальными источниками и неглубокими скважинами до 78 м, что послужило основой для предположения о существовании термальных вод на прогнозном участке, где также на различных глубинах выделены объекты с низкими значениями удельных электрических сопротивлений. На эталонном участке геофизические профили проложены вдоль (зондирование становлением поля в ближней зоне) и вкрест (вертикальное электромагнитное зондирование) простирания долины р. Шивэртийн-Гол (рис. 2, 3). В геоэлектрическом разрезе месторождение гидротерм Шивэрт выделяется в виде неглубоко залегающего резервуара с низкими значениями удельных электрических сопротивлений 0–30 Ом·м. В 500 м выше по склону долины на восток, в точке V3 обнаружен еще один объект с пониженными значениями удельных электрических сопротивлений до 80–100 Ом·м. В плане он совпадает с местоположением скважины холодного питьевого водоснабжения курорта «Шивэрт».

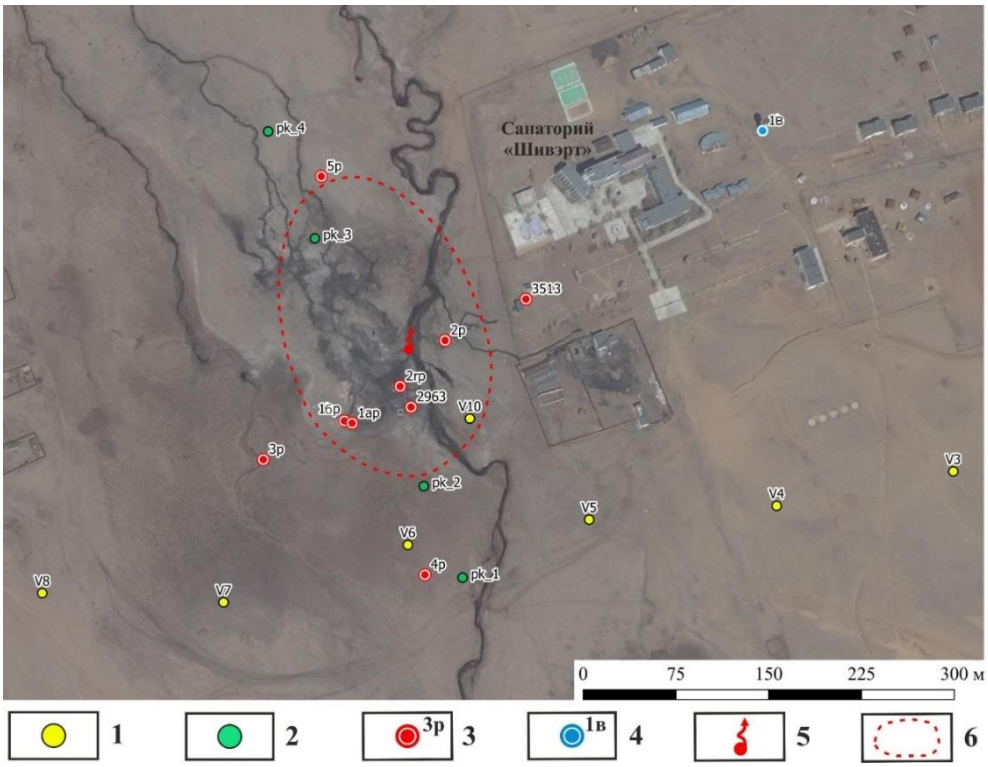

Рис. 2. Схема геофизических профилей в районе долины р. Шивэртийн-Гол:
1 – точки вертикального электромагнитного зондирования; 2 – точки зондирования становлением поля в ближней зоне; 3 – скважины, вскрывшие термальные и субтермальные воды; 4 – водозаборная скважина; 5 – термальный источник; 6 – проекция гидрогеотермального резервуара
Fig. 2. Scheme of geophysical profiles in the Shivertijn-Gol river valley:
1 – vertical electromagnetic sounding points; 2 – transient electromagnetic sounding points; 3 – thermal and sub-thermal water wells; 4 – water intake well; 5 – thermal source; 6 – hydrothermal geological reservoir projection

В результате проведения поисково-разведочных работ Аршанской партией Улан-Баторского геологического управления было пробурено четыре скважины и еще одна – по результатам работ гидрогеологического отряда Института земной коры СО РАН. Составлены схематические гидрогеологический и геотермический разрезы вкрест простирания долины р. Шивэрт (рис. 4). Разгрузка термальных вод происходит по зоне разлома через песчано-гравийные отложения, а сам гидрогеотермальный резервуар сосредоточен в зоне дробления коренных пород на глубине от 40 до 150 м и имеет свой подводящий канал. Проекция этого гидрогеотермального резервуара на земную поверхность имеет овальную форму, что хорошо прослеживается по гидрогеологическому, геоэлектрическому разрезам и геоморфологическим признакам (см. рис. 2–4). Деградация многолетней мерзлоты обнажила выходы обломков коренных пород в пойме р. Шивэртийн-Гол.

Прогнозный участок расположен в долине р. Урд-Тамир в 7–8 км от аймачного центра г. Цэцэрлэг у подножья вулкана Сангийн-Толгой. На самом вулкане обнаружен горизонт гиалокластитов и подушечных лав, перекрытый базальтовыми потоками. Поток из нижней части лавового пакета показал среднемиоценовый K-Ar возраст 15,6 ± 0,7 млн лет [20]. Гиалокластиты и подушечные лавы имеют мощность до 30 м. Эти породы явились результатом взаимодействия магматических расплавов с водой среднемиоценового палеоозера Тамирской впадины. Под слоем гиалокластитов и подушечных лав можно ожидать распространение обломочных отложений, накопившихся в палеоозере при нисходящем движении тектонических блоков фундамента впадины. На прогнозном участке

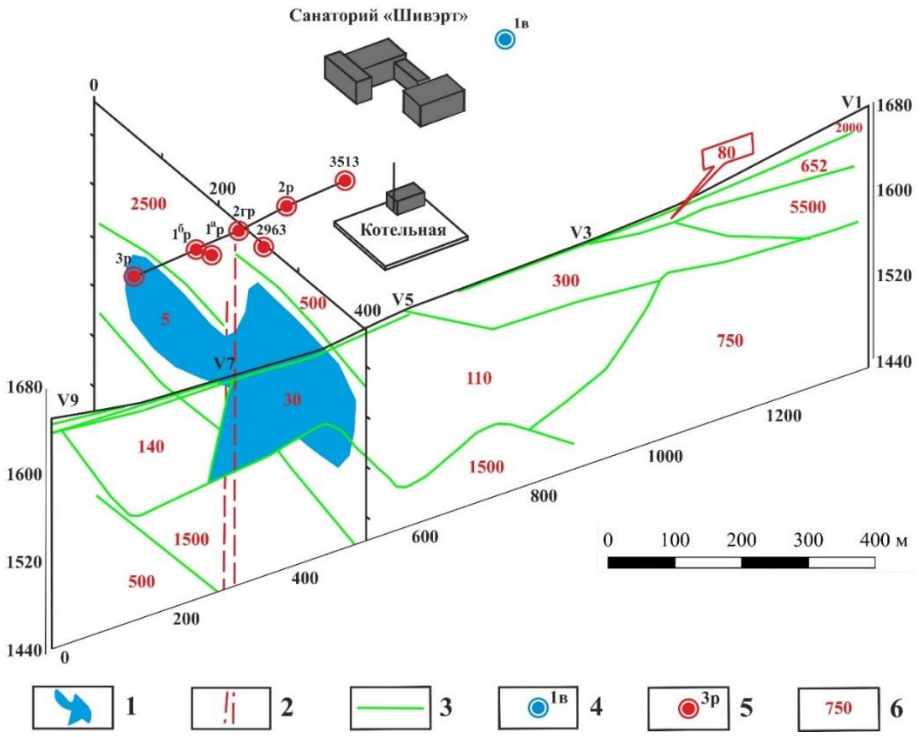

Рис. 3. Схема геоэлектрических разрезов в псевдотрехмерной проекции с указанием контура территории санатория «Шивэрт»:
1 – гидрогеотермальный резервуар; 2 – зона разлома; 3 – границы геоэлектрических слоев; 4 – водозаборная скважина; 5 – скважины, вскрывшие термальные и субтермальные воды; 6 – значения удельных электрических сопротивлений

Fig. 3. Scheme of geoelectric sections in pseudo three-dimensional projection indicating the contour of the Shivert Sanatorium territory:
1 – hydrothermal geological resevoir; 2 – fault zone; 3 – boundaries of the geoelectric layers; 4 – water intake well; 5 – thermal and sub-thermal water wells; 6 – electrical resistivity values

геофизические исследования проводились методом электромагнитного зондирования и вызванной поляризации. На геоэлектрическом разрезе по аналогии с разрезом на эталонном участке Шивэрт выделяются как субгоризонтальные, так и субвертикальные зоны с аномально низкими значениями удельных электрических сопротивлений 1–10 Ом·м (рис. 5). Субгоризонтальные структурные элементы представляют собой, по нашему мнению, высокотемпературные минерализованные гидротермальные резервуары, а субвертикальные объекты являются подводящими каналами, по которым осуществляется подъем нагретых вод с больших глубин. Стоит отметить, что размеры этих резервуаров небольшие – 100–200 м, залегают они на глубинах от 400 до 2000 м. Сверху гидротермальные резервуары перекрыты непроницаемыми породами и многолетней мерзлотой. Вертикальное электромагнитное зондирование на прогнозном участке было проведено до глубин 80–100 м и показало отсутствие вторичных гидротермальных резервуаров на этих глубинах. Бурение заверочной скважины глубиной 123 м подтвердило наличие двух обводненных зон с низкими температурами, выделенных на геоэлектрическом разрезе. В 2016 г. было начато бурение скважины проектной глубиной 700 м, однако на глубине 450 м оно было остановлено. Скважина вскрыла напорные субтермальные воды с температурой 16 °С на забое. При определении геотермических градиентов для четырех интервалов (через 100 м) выполнена непрерывная запись температур по стволу скважины. Выяснилась достаточно сложная картина сочетания обводненных зон

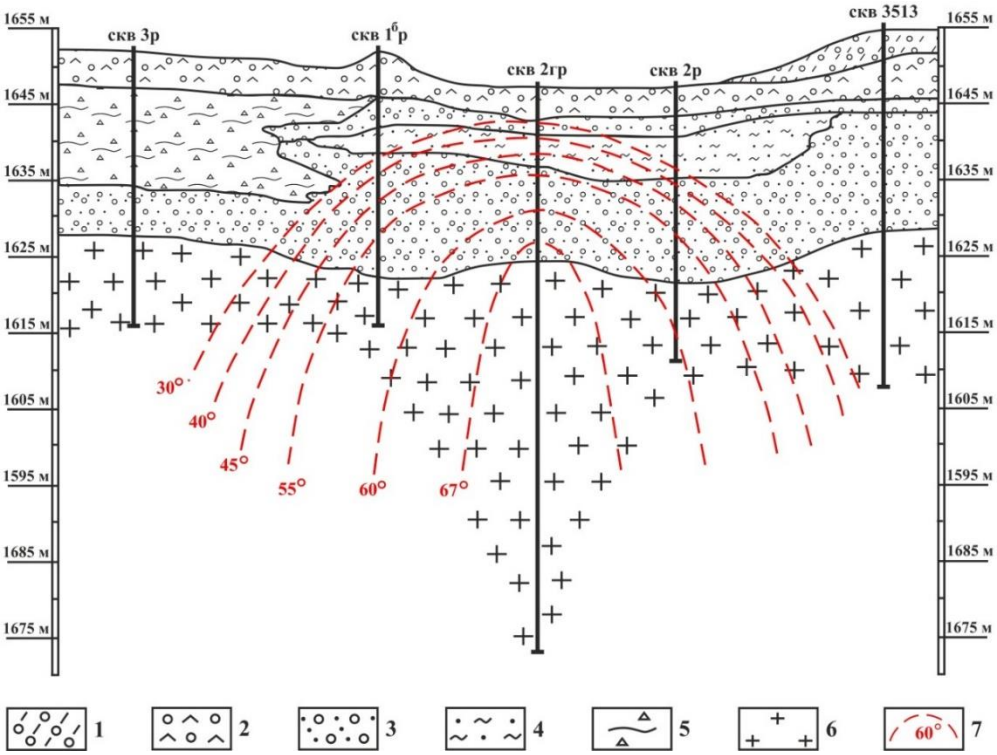

Рис. 4. Гидрогеологический и геотермический разрезы вкрест простирания долины р. Шивэртийн-Гол:

1 – супесь и суглинок темновато-бурого цвета с редкими валунами; 2 – валунно-обломочный материал с заполнителем из тонкозернистых песков; 3 – пески с гравием; 4 – разнозернистые пески с прослоями глины зеленовато-темных цветов; 5 – глины желтовато-бурого цвета с редким гравием и дресвой; 6 – граниты окварцованные, измененные, розового цвета; 7 – гидроизотермы

Fig. 4. Hydrogeological and geothermal sections across the strike of the Shivertin-Gol river valley:

1 – sandy loam and loam of dark brown color with rare boulders; 2 – boulder-clastic material with fine-grain sand aggregate; 3 – gravel sands; 4 – variegated sands with clay interbeds of a dark greenish color; 5 – yellow-brown clays with rare gravel and gruss; 6 – silicified granites, altered, pink; 7 – hydro isotherms

с различными температурными градиентами. Градиент температуры *gradt* на первых 300 м составил +3,3 °С, причем он возрастал с каждым последующим интервалом, однако вследствие притока холодных вод на глубине 345–360 м понизился до +2,5 °С. Тенденция на увеличение *gradt* с глубиной дает надежду на вскрытие термальных вод с температурой до 50 °С на доступных глубинах. Величина теплового потока с учетом среднего *gradt* +3 °С, полученного при бурении 450-метровой скважины, и среднего значения теплопроводности метаморфических пород 2,65 Вт/(м·град.), принятого для Хангайского сводового поднятия [21, 22], составит 79,5 мВт/м^2, что превышает величины теплового потока, полученные расчетным путем, по содержанию изотопов гелия в термальных водах Хангая.

Заключение

Высокие температуры подземной гидросферы Восточного Хангая связаны с магматогенной термоаномалией и представляют огромный практический интерес. Этот регион может быть рекомендован не только для использования гидрогеотермальной энергии в коммунальном хозяйстве, но и для выработки электроэнергии (минимальная необходимая температура – 130 °С при дебите 5–6 л/с). Расчетные глубины формирования гидротерм находятся в пределах 4 км, однако их реальные значения, учитывая потери тепла при подъеме и смешении с метеорными водами, будут значительно больше.

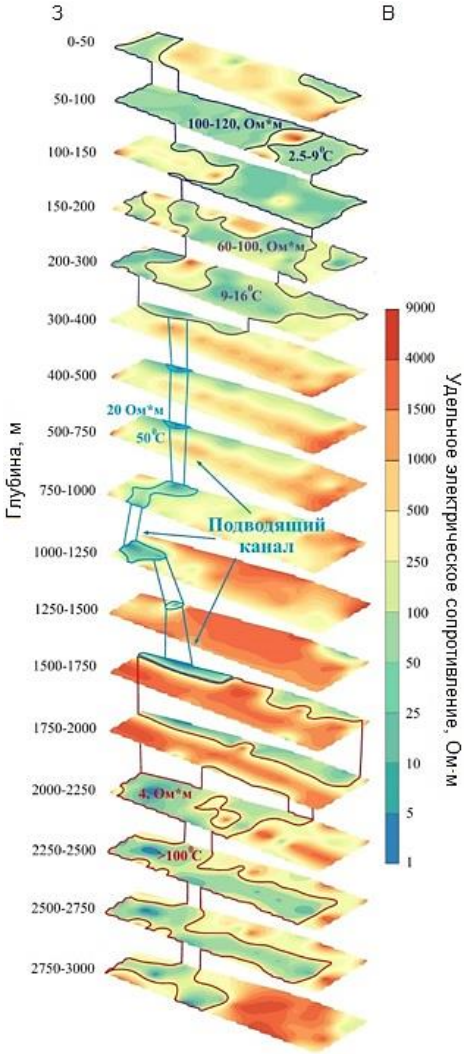

Рис. 5. Горизонтальные срезы удельных электрических сопротивлений по данным метода вызванной поляризации
Fig. 5. Horizontal sections of electrical resistivity according to the induced polarization method data

По результатам бурения выявлена сложная картина чередования обводненных зон с холодными и субтермальными водами в трещинном резервуаре кристаллического массива. Для выведения субтермальных и термальных вод с более высокими температурами необходимо надежно изолировать интервалы (места) притоков холодных вод в ствол скважины.

Геофизические методы, в частности метод зондирования становлением поля в ближней зоне, метод вызванной поляризации и технология вертикальных электромагнитных зондирований, вполне могут быть использованы для поисков скрытых гидрогеотермальных ресурсов в Монголо-Байкальском регионе, где сама природа создала все необходимые предпосылки для существования многочисленных месторождений термальных вод на небольших доступных для бурения глубинах.

Библиографический список

1. Blodgett L., Slack K. Geothermal 101: basics of geothermal energy production and use. Washington: Geothermal Energy Association, 2009. 55 p.

2. Намнандорж О., Цырен Ш., Нямдорж Ө. БНМАУ-ын рашаан. Улаанбаатар: Изд-во УХГ, 1966. 468 с.

3. Лысак С.В. Геотермия южных районов Восточной Сибири // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века: сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, 1996. С. 17–23.

4. Рассказов С.В., Чувашова И.С., Мордвинова В.В., Брандт И.С., Брандт С.В., Ершов К.В. Развитие кайнозойского магматизма Центральной Азии как выражение процессов образования Саяно-Монгольского низкоскоростного мантийного домена // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: материалы науч. совещ. по интеграционным программам Отделения наук о Земле СО РАН. Вып. 4. Т. 2. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2006. С. 95–98.

5. Саватенков В.М., Ярмолюк В.В., Кудряшова Е.А., Козловский А.М. Источники и геодинамика позднекайназойского вулканизма Центральной Монголии по данным изотопно-геохимических исследований // Петрология. 2010. Т. 18. № 3. С. 297–327.

6. Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Кузьмин М.И. Зональные магматические ареалы и анорогенное баталитообразование в Центрально-Азиатском складчатом поясе: на примере позднепалеозойской Хангайской магматической области // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 457–475.

7. Турутанов Е.Х. Крупнейшие гранитоидные плутоны Земли: форма и размеры. Бо-Бассен: Lambert Academic Publishig, 2019. 80 с.

8. Поляк Б.Г., Хуторский М.Д., Каменский И.Л., Прасолов Э.М. Тепломассопоток из мантии на территории Монголии // Геохимия. 1994. № 12. С. 1693–1705.

9. Филиппова И.Б. Основные черты строения и развития Хангайского синклинория // Геотектоника. 1969. № 5. С. 77–95.

10. Колонин А.Г. Возможности использования результатов сейсмического просвечивания для обнаружения локальных неоднородностей // Геология и геофизика. 1989. № 3. С. 101–110.

11. Иселидзе О.В., Жуков В.С., Цыбульский С.П., Баянова Н.Г. Влияние температуры на удельное электрическое сопротивление водонасыщенных образцов песчаника // Вести газовой науки. 2014. № 4 (20). С. 184–187.

12. Бадминов П.С., Мироманов А.В., Оргильянов А.И., Крюкова И.Г., Тарасов И.А., Степаненко А.В. Перспективы поисков термальных вод в Усть-Селенгинском артезианском бассейне // XX Всероссийское совещание по подземным водам востока России. Иркутск: ООО «Географ», 2012. С. 285–288.

13. Oyuntsetseg D. Geochemical characterization of the thermal fluid from Khangay area, Central Mongolia // Geothermal Training in Iceland. Reykjavik: UNU-GTP, 2009. P. 125–150.

14. Лаврушин В.Ю., Маковозов А.О. Температура минеральных вод – отражение магматогенной термоаномалии в районе вулкана Казбек // Вестник Владикавказского научного центра. 2004. Т. 4. № 3. С. 33–40.

15. Kharaka Y.K., Mariner R.H. Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins // Thermal history of sedimentary basins. Methods and case histories. New York: Springer-Verlag, 1989. P. 99–117.

16. Philip H., Cisternas A., Gvishniani A., Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision // Tectonophysics. 1989. Vol. 161. P. 1–21. https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90297-7

17. Fournier R.O., Truesdell A.H. An empirical Na-K-Ca chemical geothermometer for natural waters // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1973. Vol. 37. Iss. 5. P. 1255–1275. https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90060-4

18. Голубев В.А. Тепловые и химические характеристики гидротермальных систем Байкальской рифтовой зоны // Советская геология. 1982. № 10. С. 100–108.

19. Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Гео, 2007. 222 с.

20. Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Фефелов Н.Н., Саранина Е.В. Калиевая и калинатровая вулканические серии в кайнозое Азии. Новосибирск: Гео, 2012. 351 с.

21. Лысак С.В., Дорофеева Р.П. Термальное состояние литосферы в Монголии // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 9. С. 929–941.

22. Дорофеева Р.П. Тепловой поток территории Монголии // Глубинное строение и геодинамика Монголо-Сибирского региона: сб. стат. Новосибирск: Наука, 1995. С. 123–145.

References

1. Blodgett L, Slack K. *Geothermal 101: basics of geothermal energy production and use*. Washington: Geothermal Energy Association; 2009. 55 p.

2. Намнандорж О, Цырен Ш, Нямдорж Ө. *Arshans of the Mongol People's Republic*. Ulaanbaatar: State Press Service Committee; 1966. 468 p. (In Mongol.)

3. Lysak SV. Geothermy of the southern regions of Eastern Siberia. In: *Geofizicheskie issledovaniya v Vostochnoi Sibiri na rubezhe XXI veka* = Geophysical exploration in Eastern Siberia at the turn of the 21st century. Novosibirsk: Nauka; 1996. p.17–23. (In Russ.)

4. Rasskazov SV, Chuvashova IS, Mordvinova VV, Brandt IS, Brandt SV, Ershov KV. Evolution of Cenozoic magmatism in Central Asia as an expression of the processes of the Sayan-Mongolian low-speed mantle domain formation.

In: *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa: materialy nauchnogo soveshchaniya po integratsionnym programmam Otdeleniya nauk o Zemle SO RAN* = Geodynamic evolution of the Central Asian active belt lithosphere: Proceedings of the Scientific Meeting on the Integration Programs, Department of Earth Sciences, SB RAS. Iss. 4. Vol. 2. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, SB RAS; 2006. p.95–98. (In Russ.)

5. Savatenkov VM, Yarmolyuk VV, Kudryashova EA, Kozlovskii AM. Sources and geodynamics of the Late Cenozoic volcanism of Central Mongolia according to isotope geochemical studies. *Petrologiya*. 2010;18(3):297–327. (In Russ.)

6. Yarmolyuk VV, Kozlovskii AM, Kuz'min MI. Zonal magmatic ranges and anarogenic battle formation in the Central Asian folded belt: a case study of the Late Paleozoic Khangai magmatic region. *Geologiya i geofizika*. 2016;57(3):457–475. (In Russ.)

7. Turutanov EKh. *The largest granitoid plutons of the Earth: shape and size*. Beau Bassin: Lambert Academic Publishig; 2019. 80 p. (In Russ.)

8. Polyak BG, Khutorskii MD, Kamenskii IL, Prasolov EM. Mantle heat-and-mass flow in the territory of Mongolia. *Geokhimiya*. 1994;12:1693–1705. (In Russ.)

9. Filippova IB. The main features of the structure and development of the Khangai synclinorium. *Geotektonika*. 1969;5:77–95. (In Russ.)

10. Kolonin AG. Prospects of using the results of seismic transmission to detect local inhomogeneities. *Geologiya i geofizika*. 1989;3:101–110. (In Russ.)

11. Iselidze OV, Zhukov VS, Tsybul'skii SP, Bayanova NG. Influence of temperature on specific electroresistance of the water-saturated sandstone. *Vesti gazovoi nauki*. 2014;4:184–187. (In Russ.)

12. Badminov PS, Miromanov AV, Orgil'yanov AI, Kryukova IG, Tarasov IA, Stepanenko AV. Prospects of the exploration for thermal waters in the Ust-Selenginsky artesian basin. *XX Vserossiiskoe soveshchanie po podzemnym vodam vostoka Rossii* = 20th All-Russian Meeting on the Groundwaters of the Russian East. Irkutsk: LLC “Geograf”; 2012. p.285–288. (In Russ.)

13. Oyuntsetseg D. Geochemical characterization of the thermal fluid from Khangay area, Central Mongolia. *Geothermal Training in Iceland*. Reykjavik: UNU-GTP; 2009. p.125–150.

14. Lavrushin VYu, Makovozov AO. Mineral water temperature as a reflection of magmatogene thermal anomaly in the Kazbek volcano area. *Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra*. 2004;4(3):33–40. (In Russ.)

15. Kharaka YK, Mariner RH. Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. In.: *Thermal history of sedimentary basins. Methods and case histories*. New York: Springer-Verlag; 1989. p.99–117.

16. Philip H, Cisternas A, Gvishniani A, Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision. *Tectonophysics*. 1989;161:1–21. https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90297-7

17. Fournier RO, Truesdell AH. An empirical Na-K-Ca chemical geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1973;37(5):1255–1275. https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90060-4

18. Golubev VA. Thermal and chemical characteristics of the hydrothermal systems in the Baikal rift zone. *Sovetskaya geologiya*. 1982;10:100–108. (In Russ.)

19. Golubev VA. *Conductive and convective heat transfer in the Baikal rift zone*. Novosibirsk: Geo; 2007. 222 p. (In Russ.)

20. Rasskazov SV, Chuvashova IS, Yasnygina TA, Fefelov NN, Saranina EV. *Potassium and kalinar volcanic series in the Cenozoic of Asia*. Novosibirsk: Geo; 2012. 351 p. (In Russ.)

21. Lysak SV, Dorofeeva RP. Thermal state of the lithosphere in Mongolia. *Geologiya i geofizika*. 2003;44(9):929–941. (In Russ.)

22. Dorofeeva RP. The heat flow of the territory of Mongolia. In: *Glubinnoe stroenie i geodinamika Mongolo-Sibirskogo regiona* = Deep structure and geodynamics of the Mongol-Siberian region. Novosibirsk: Nauka; 1995. p.123–145. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Бадминов П.С., Сурмаажав Д., Ескин А.Ю., Шкиря М.С. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Prokopii S. Badminov, Damdin Surmaajav, Alexander Yu. Eskin, Mikhail S. Shkirya are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors

Бадминов Прокопий Сократович,
ведущий инженер лаборатории гидрогеологии,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
✉ e-mail: prokop_sbad@mail.ru
Prokopii S. Badminov,
Lead Engineer, Hydrogeology Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
✉ e-mail: prokop_sbad@mail.ru

Сурмаажав Дамдин,
старший гидрогеолог,
корпорация «Монгол Ус»,
16050, г. Улан-Батор, р-н Баянгол, ул. Чингунжав, Монголия,
e-mail: surmaajavdamdin@yahoo.com
Damdin Surmaajav,
Senior Hydrogeologist,
“Mongol Us” Corporation,
Chingunzhav St., Bayangol District, Ulan Bator 16050, Mongolia,
e-mail: surmaajavdamdin@yahoo.com

Ескин Александр Юрьевич,
научный сотрудник лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: eskin@crust.irk.ru
Alexander Yu. Eskin,
Researcher, Laboratory of Engineering Seismology and Seismogeology,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: eskin@crust.irk.ru

Шкиря Михаил Сергеевич,
инженер,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: ms.shkirya@gmail.com
Mikhail S. Shkirya,
Engineer,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: ms.shkirya@gmail.com