

УДК 550.83:553.78

Первые результаты комплексных геофизических исследований месторождения термальных вод Гоуджекит (участок «Солнечный», Северное Прибайкалье)

■ Шашкеева Л.П.¹, Буддо И.В.^{1,2}, Черных А.А.¹, Часовитин П.А.¹, Рукосуев Д.А.¹, Добрынина А.А.¹

¹ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск.

² Сибирская школа геонаук ИрННТУ, г. Иркутск.

Аннотация. Представлены первые результаты комплексных геофизических исследований месторождения термальных вод «Гоуджекит» на участке «Солнечный» в Северном Прибайкалье, выполненных в 2025 г. Цель работ состояла в уточнении геологического строения разреза, выявлении разрывных нарушений, обводнённых зон и возможных путей разгрузки термальных вод. Комплекс методов включал электротомографию (ЭТ), пассивную сейсморазведку и аэротепловизионную съёмку. По данным пассивной сейсморазведки мощность осадочного разреза предварительно оценена в 380–470 м; кровля фундамента характеризуется неровным, предположительно блоковым строением. Методом электротомографии выявлены низкоомные области на глубинах около 40–100 м, интерпретируемые как водонасыщенные рыхлые отложения и трещиноватые обводнённые породы, а также субвертикальная зона резкого изменения сопротивления, вероятно, связанная с разрывным нарушением. Тепловизионная съёмка позволила выделить температурные аномалии и отделить техногенный прогрев от потенциальных участков естественной разгрузки тепла. Совместная интерпретация результатов подтверждает ведущую роль разломно-трещинных зон в формировании гидротермальной системы и обосновывает направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: термальные воды, Гоуджекит, Северное Прибайкалье, электротомография, пассивная сейсморазведка, аэротепловизионная съёмка, разрывные нарушения.

Введение

Термальные воды Байкальской рифтовой зоны приурочены преимущественно к крупным разрывным нарушениям и зонам повышенной трещиноватости кристаллических пород. Их формирование связывают с инфильтрацией атмосферных вод, глубокой циркуляцией по тектонически ослабленным зонам, нагревом в условиях повышенного геотермического градиента и последующим восходящим движением по разломам [5, 6]. Сложное блоковое строение фундамента, неоднородность четвертичных отложений и локальный характер разгрузки затрудняют картирование геотермальных структур только по данным бурения и наземных

гидрогеологических наблюдений.

Месторождение Гоуджекит, также известное по эксплуатируемому участку «Солнечный», ранее изучалось преимущественно гидрогеологическими и режимными методами [4]. Имеющиеся материалы указывают на разломно-трещинный тип коллектора, однако детальные комплексные геофизические исследования непосредственно в пределах участка ранее практически не проводились. Это обусловило постановку в 2025 г. опытно-методических работ с использованием методов электротомографии, пассивной сейсморазведки и аэротепловизионной съёмки.

Цель настоящей работы заключается в представлении первых результатов комплексного исследования строения месторождения и комплексирования геофизических методов для выявления разрывных нарушений, обводнённых зон и участков разгрузки термальных вод.

Геолого-гидрогеологическая характеристика

Месторождение термальных вод «Гоуджекит» расположено в Северо-Байкальском районе Республики Бурятия, северо-западнее г. Северобайкальска, на правом пологом борту долины р. Гоуджекит. Расстояние до Северобайкальска составляет около 30 км. База отдыха и эксплуатационная скважина № 20 находятся приблизительно в 0,5 км южнее разъезда Гоуджекит. Абсолютные отметки рельефа в пределах участка изменяются от 660 до 700 м [4].

Район входит в состав Байкальской рифтовой зоны и характеризуется сложным блоково-разломным строением. В региональном структурном плане существенную роль играют Тыйский и глубокий Левоминьский разломы, а также система сопряжённых нарушений. По имеющимся представлениям, пересече-

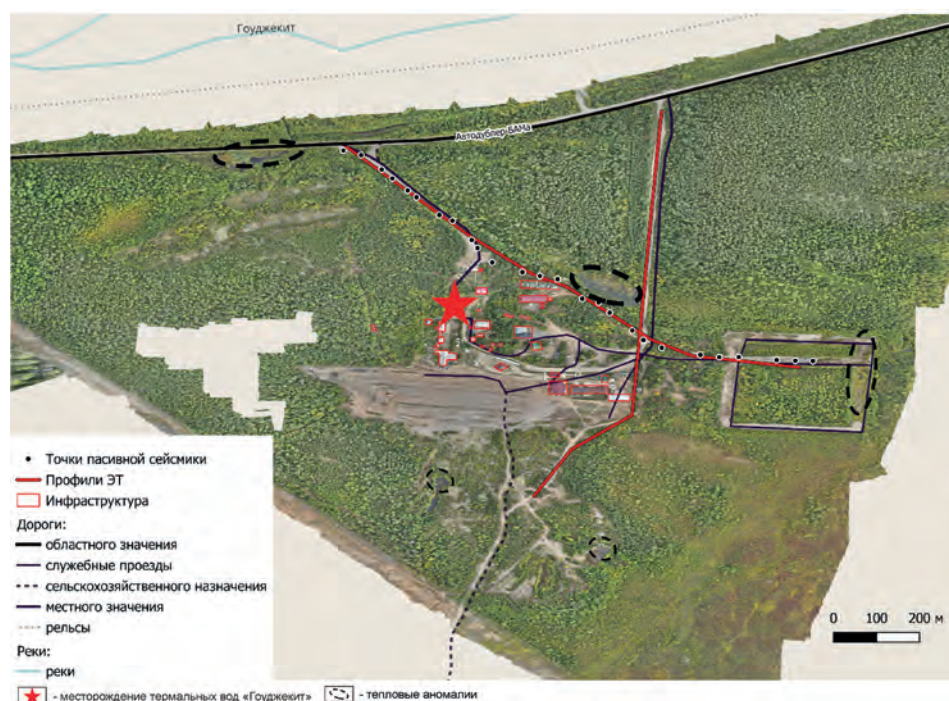
ния и оперяющие ветви разломов образуют проницаемые зоны, обеспечивающие глубокую циркуляцию и восходящую миграцию нагретых вод [4, 5].

Эксплуатационная скважина № 20 пробурена в 1989 г. до глубины 170 м. Напорные термальные воды вскрыты в интервале 75-90 м. При бурении дебит самоизлива составлял 6 л/с, пьезометрический уровень установился на отметке +14 м, первоначальная температура воды достигала 45,5 °С. В 2003-2017 гг. температура самоизлива сохранялась преимущественно в диапазоне 51-53 °С. Воды отнесены к трещинно-жильному типу и связаны с водоносной зоной Тыйского разлома [4].

Материалы и методы

Комплекс геофизических исследований 2025 г. включал ЭТ, пассивную сейсморазведку и аэротепловизионную съёмку. Положение профилей и пунктов наблюдений приведено на рис. 1. Выбор комплекса определялся необходимостью изучения объекта на разных глубинных уровнях: от температурного поля поверхности до строения рыхлого чехла и кровли кристаллического фундамента.

Исследования методом ЭТ выпол-



◀ Рис. 1. Схема расположения профилей электротомографии и пунктов пассивной сейсморазведки на участке «Солнечный» (материалы исследований 2025 г.).

нялись многоканальной аппаратурой «СКАЛА-48К12» с применением установки Шлюмберже. Длина одной расстановки составляла 480 м, расстояние между соседними электродами – 10 м. Для увеличения протяжённости профилей использовалась технология последовательного переноса измерительной косы. Общий объём полевых электро-разведочных работ составил 1,8 пог. км. Обработка и двумерная инверсия данных выполнены в программе ZondRes2D. Получены разрезы распределения удельного электрического сопротивления до глубины около 100 м.

Наблюдения методом пассивной сейсморазведки проводились аппаратурой «Байкал-8Н». Пункты располагались вдоль профиля 1 с шагом 25 м. Продолжительность регистрации фонового сейсмического сигнала на каждом пункте составляла около 30 мин. Выполнено 26 физических наблюдений. Обработка была направлена на оценку

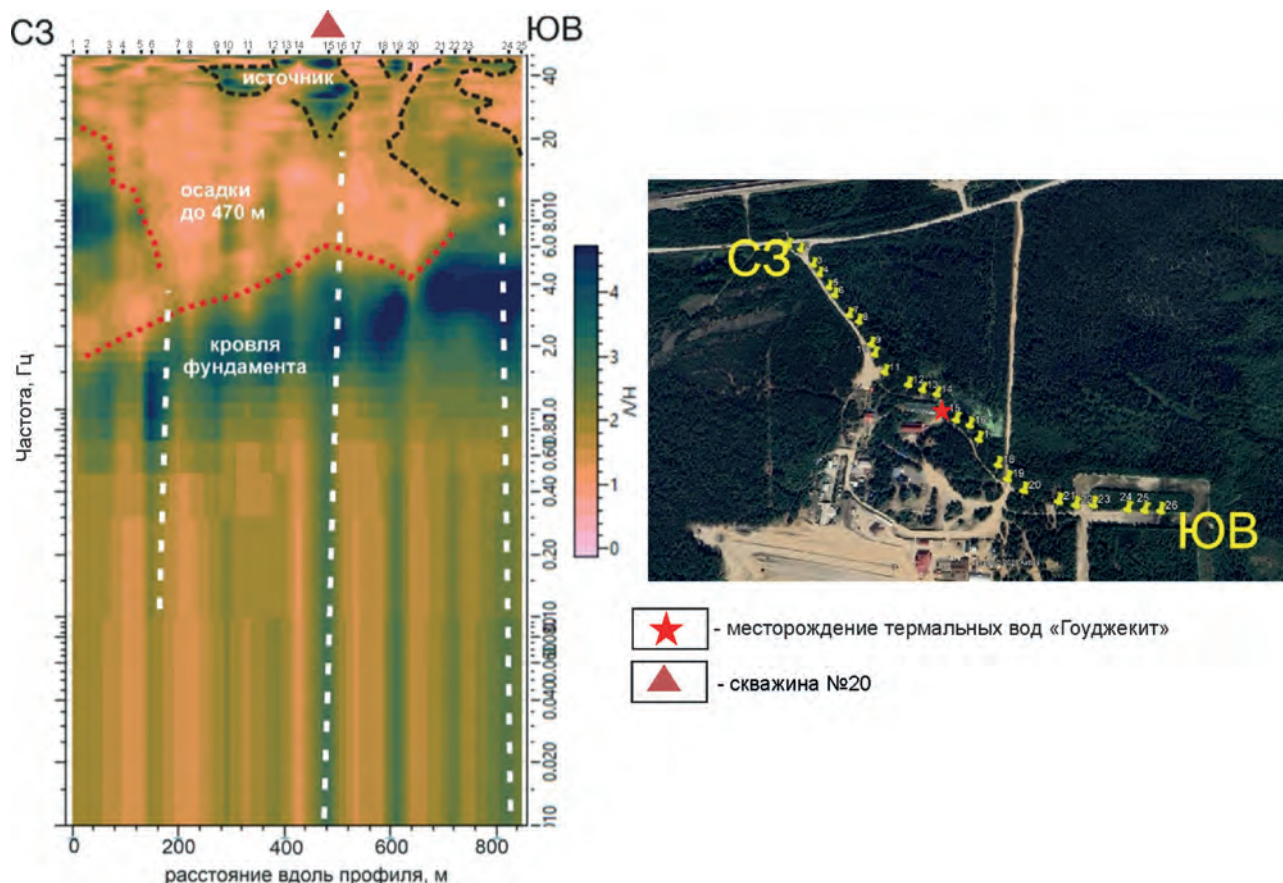
мощности осадочного разреза, определение конфигурации кровли фундамента и выделение зон нарушения сплошности геологической среды.

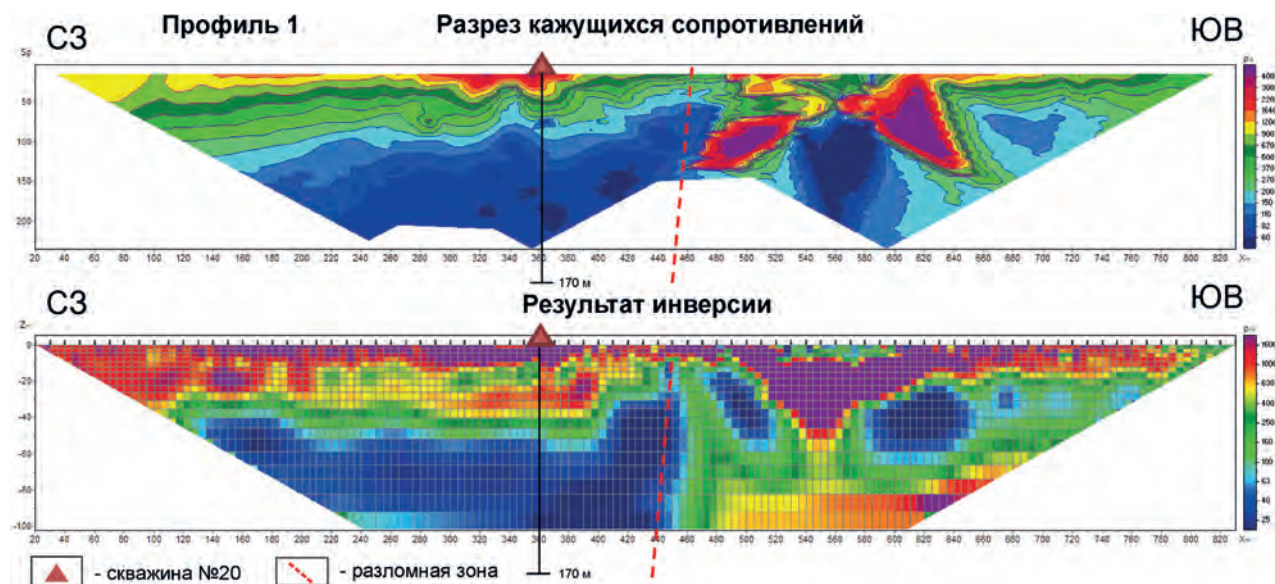
Аэротепловизионная съёмка выполнена с помощью квадрокоптера DJI Mavic 3T, оснащённого тепловизионной камерой с разрешением 640×512 пикселей и частотой регистрации 30 кадров/с. Высота полёта составляла 100 м, продольное и поперечное перекрытие кадров – 80 %. Площадь съёмки достигла $0,08 \text{ км}^2$. Обработка материалов и построение тепловизионного ортофотоплана выполнены в программе Earth-Thermal, разработанной в ИЗК СО РАН [7].

Результаты исследований

По результатам обработки пассивной сейсморазведки построен глубинный разрез вдоль профиля 1 (рис. 2). Предварительная интерпретация показывает, что мощность осадочного разреза долины составляет около 380–470

▼ Рис. 2. Результат пассивной сейсморазведки по профилю 1.





▲ Рис. 3. Результаты электротомографии: разрез кажущегося сопротивления (сверху) и результаты двумерной инверсии (снизу) по профилю 1 (СЗ–ЮВ).

м. Кровля кристаллического фундамента имеет неровное, предположительно блоковое строение. Изменения её положения по профилю сопровождаются зонами повышенной неоднородности, которые могут соответствовать разрывным нарушениям.

В северо-западной части профиля, непосредственно в районе источника Гоуджекит, выделяется локальная зона нарушения сплошности среды. Её положение согласуется с представлениями о тектоническом контроле разгрузки термальных вод. Также предполагаемые нарушения отмечаются в центральной и юго-восточной частях профиля по резким изменениям кровли фундамента.

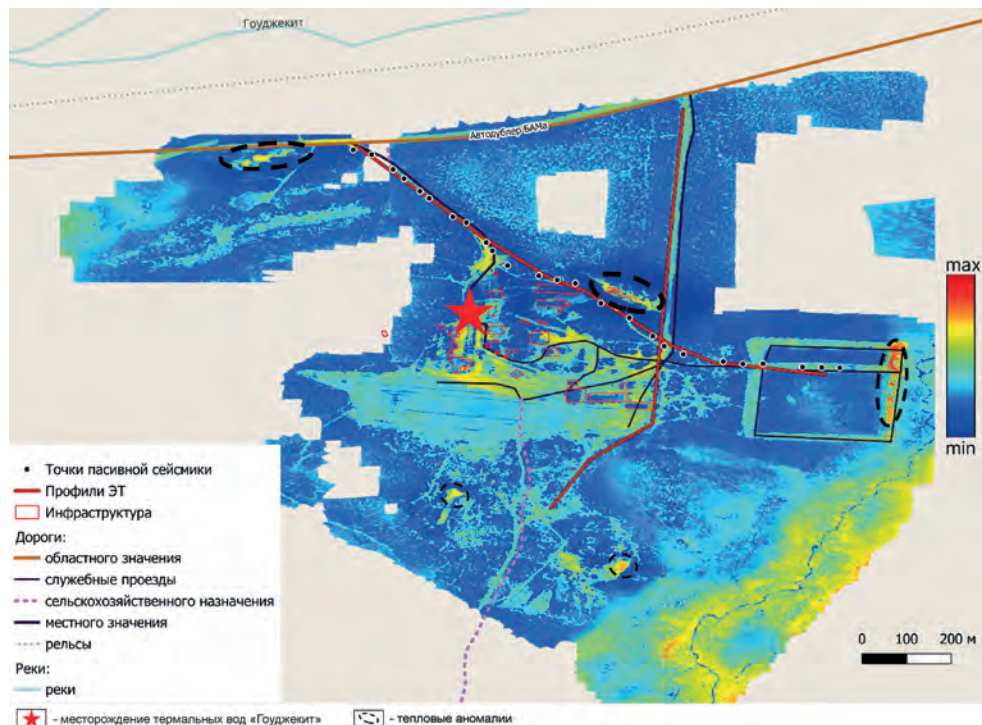
Исследования методом ЭТ выполнены по двум профилям. В верхней части профиля №1 преобладают относительно высокоомные образования с удельным электрическим сопротивлением от нескольких сотен до первых тысяч Ом·м (рис. 3). На глубинах приблизительно 40-100 м прослеживаются низкоомные области с сопротивлением преимущественно менее 100-160 Ом·м. С учётом информации о геологическом строении территории исследования, они могут соответствовать водонасыщенным рыхлым отложениям или трещиноватым обводнённым породам.

В интервале около 440-470 м профиля выделяется узкая субвертикальная зона контрастного изменения сопротивления. По морфологии и положению она предварительно интерпретируется как зона разрывного нарушения. К юго-востоку наблюдается чередование высокоомных и низкоомных блоков, отражающее неоднородное строение фундамента. Эксплуатационная скважина № 20 расположена приблизительно на отметке 360 м профиля. Смещение основной контрастной аномалии относительно скважины может указывать на связь водопритока с опережающими трещинами или с широкой зоной дробления, а не только с осевой частью нарушения.

На тепловизионном ортофотоплане выделяются участки повышенной температуры, пространственно связанные как с объектами инфраструктуры, так и с незастроенными частями территории (рис. 4). Аномалия в центральной части участка интерпретируется как техногенная, поскольку приурочена к зданиям, бассейнам и коммуникациям, используемым для транспортировки термальных вод.

Другие выделенные участки расположены за пределами основных источников техногенного прогрева. Вместе с

► **Рис. 4. Теплови-
зионный ортофо-
топлан участка
«Солнечный».**
Штрихпунктиром
показаны выделен-
ные температур-
ные аномалии; цен-
тральная аномалия
интерпретируется
как техногенная.



тем, на температуру поверхности влияют влажность грунта, растительность, экспозиция склонов, свойства покрытий и суточный ход температуры.

Совместная интерпретация данных ЭТ и пассивной сейсморазведки позволяет предположить наличие неоднородной осадочной толщи, залегающей на тектонически нарушенном фундаменте. По данным наблюдений пассивной сейсморазведкой мощность осадочного чехла составляет около 380-470 м. При такой глубине кровли фундамента низкоомные области, выявленные электротомографией на глубинах 40-100 м, располагаются внутри осадочной толщи и могут отражать водонасыщенные горизонты.

Резкое изменение сопротивления в интервале 440-470 м профиля 1 может говорить о наличии флюидонасыщенной разломной зоны. В сочетании с предполагаемыми нарушениями на сейсмическом разрезе это допускает существование разломно-трещинной системы, обеспечивающей восходящее движение термальных вод и их последующее распространение по проницаемым горизонтам осадочной толщи. Интервал водопритоков в скважине № 20, состав-

ляющий 75-90 м, согласуется по глубине с распространением низкоомных областей.

Обсуждение результатов

Наиболее важным результатом проведенных исследований является выявление в районе источника и скважины системы признаков разломно-блокового строения. Сейсмический разрез указывает на нарушение сплошности среды в северо-западной части профиля и значительные изменения глубины кровли фундамента. На разрезе электротомографии по профилю 1 выделяется субвертикальная контрастная зона, а в окружающем пространстве развиты низкоомные области. Совпадение этих признаков позволяет предполагать наличие водопроводящей разломно-трещинной зоны.

Предварительная модель предполагает инфильтрационное питание системы, глубокую циркуляцию вод по зонам тектонической трещиноватости, их нагрев и восходящую миграцию по пересекающимся нарушениям. В приповерхностной части термальные воды могут распространяться по проницаемым зонам в рыхлых отложениях, формируя ло-

кальные низкоомные и температурные аномалии. Скважина № 20, вероятно, вскрывает одну из ветвей этой системы в интервале 75-90 м.

Вместе с тем, остаётся невыясненной глубина заложения разлома, т.к. примененные методы позволяют изучать геологический разрез не более чем на 1 км. Для построения глубинной геолого-геофизической модели источника термальных вод целесообразна постановка других методов, к примеру, магнитотеллурического зондирования (МТЗ) либо зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Таким образом, целесообразно проведение полномасштабных геологоразведочных работ, в т.ч. бурения для заверки выявленных геофизических аномалий.

Заключение

По данным пассивной сейсморазведки мощность осадочного разреза предварительно оценена в 380-470 м; в районе источника выделено разрывное нарушение. ЭТ выявила протяжённые низкоомные области по профилю 1 на глубинах приблизительно 40-100 м и субвертикальную зону резкого изменения сопротивления, которые могут быть связаны с наличием водонасыщенного коллектора, разломной зоны и участками трещиноватости фундамента. Аэротепловизионная съёмка позволила отделить центральную техногенную аномалию от участков, предположительно связанных с естественной разгрузкой тепла.

Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных подтверждает ведущую роль разломно-трещинных зон в формировании месторождения термальных вод. Наиболее вероятная модель включает глубокую циркуляцию инфильтрационных вод, их нагрев и восходящее движение по системе разрывных нарушений с последующим рас-

пространением в проницаемых рыхлых отложениях. Полученные результаты могут использоваться при планировании дальнейших геофизических и гидрогеологических исследований, выборе участков заверочного бурения и организации мониторинга состояния термальных вод месторождения.

Литература

1. Гидрогеология СССР. Т. XXII. Бурятская АССР. М. : Недра, 1970. 432 с.
2. Добрынина А. А., Саньков А. В., Буддо И. В., Шелохов И. А., Саньков В. А. Возможности методов пассивной сейсморазведки при изучении геологического строения арктических районов Западной Сибири (полуостров Ямал) // Геология и геофизика. 2025. Предварительная электронная публикация. DOI: 10.15372/GiG2025192.
3. Добрынина А. А., Саньков В. А., Иванов А. В., Саньков А. В. Применение методов пассивной сейсмологии для определения параметров угольного разреза // Уголь. 2022. № S12. С. 88-93. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-S12-88-93.
4. Кислицына Л. Б. Оценка запасов подземных термальных вод месторождения «Солнечное» (Северобайкальский район, Республика Бурятия) по состоянию на 01.06.2018 г.: отчёт. ООО «Недра-Геомониторинг», 2018. Рукопись.
5. Ломоносов И. С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск : Наука, 1974.
6. Ломоносов И. С., Пиннекер Е. В., Писарский Б. И. Минеральные воды зоны влияния Байкало-Амурской магистрали // Современные исследования земной коры. Иркутск, 1975. С. 163-165.
7. Рукосуев Д.А., Буддо И.В., Шелохов И.А., Черных А.А. Earth-Thermal : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2025692115. Дата публикации: 05.11.2025.