

Комплексное применение геолого-геофизических методов при изучении геотермальных ресурсов в южном Прибайкалье (Восточная Сибирь, Иркутская область)

Н.В.ВИЛОР (Институт геохимии Сибирского отделения Российской Академии наук (ИГХ СО РАН); 664033, Иркутск-33, ул. Фаворского, 1А),
Ю.А.ДАВИДЕНКО, М.С.ШКИРЯ (Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИНИТУ); 664074, г. Иркутск-74, ул. Лермонтова, 83),
М.А.ВИЛОР (Институт географии Сибирского отделения Российской Академии наук (ИГ СО РАН), 664033, г. Иркутск-33, ул. Улан-Баторская, 1),
П.С.БАДМИНОВ (Институт земной коры Сибирского отделения Российской Академии наук (ИЗК СО РАН), 664033, г. Иркутск-33, ул. Лермонтова, 128),
А.Е.БУДЯК, А.В.ПАРШИН (Институт геохимии Сибирского отделения Российской Академии наук (ИГХ СО РАН); 664033, Иркутск-33, ул. Фаворского, 1А)

При актуальности проблемы использования альтернативных источников энергии проводится изучение геотермальных ресурсов с поисками месторождений термальных минеральных вод в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории южного Прибайкалья Иркутской области. Энергетический потенциал геотермальных ресурсов, связанных с подземными резервуарами термальных вод, контролируется структурами пересечения крупных региональных сейсмоактивных разломов с поперечными сбросами. В Муринско-Выдринской депрессии выделен блок, содержащий водные запасы подземного геотермального месторождения, с применением комплекса геологических, геохимических и геофизических методов.

Ключевые слова: подземные воды, импульсная электроразведка, тепловая, космическая, съемка, Прибайкалье.

Вилор Николай Васильевич
Давыденко Юрий Александрович
Шкиря Михаил Сергеевич
Вилор Михаил Александрович
Бадминов Прокопий Сократович
Будяк Александр Евгеньевич
Паршин Александр Вадимович



vilor@igc.irk.ru
geophys@geo.istu.edu
geophys@geo.istu.edu
mvilor@rambler.ru
prokop_sbad@mail.ru
budyak@igc.irk.ru
sarhin@geo.istu.edu

Complex application of geological and geophysical methods for research of geothermal resources in southern part of Baikal region (Eastern Siberia, Irkutsk region)

N.V.VILOR (A.P.Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the RAS),
Yu.A.DAVIDENKO, M.S.SHKIRIYA (National research Irkutsk technical University (INITU))
M.A.VILOR (Institute of geography, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (IG SB RAS)),
P.S.BADMINOV (Institute of earth crust, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (IZK SB RAS)),
A.E.BUDYAK, A.V.PARSHIN (A.P.Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the RAS)

Research of geothermal resources is conducted in the Central ecological zone of Baikal natural territory in the southern part of Baikal region (Irkutsk region) because the alternative power sources utilization problem is urgent and valid. Reserves of geothermal resources as reservoirs of underground thermal waters are controlled by crossing structures of large regional seismoactive faults with transversal faults. The block containing thermal waters reserve in the underground geothermal deposit was detected by using a complex of geological, geochemical and geophysics methods in Murino – Vidrino depression.

Key words: underground waters, impulse electrical survey, heat, flow, Baikal region.

Постановка проблемы. Центральная экологическая зона Байкальской природной территории (ЦЭЗ БПТ) находится в Байкальском регионе, имеющем статус объекта Всемирного Наследия ЮНЕСКО. На ее части вдоль южного побережья оз. Байкал в Иркутской области расположены города Слюдянка, Байкальск и поселки городского типа Выдрино, Танхой, промышленные объекты и жилые массивы которых энергодефицитны из-за необходимости тепло- и горячего водоснабжения. Традиционные способы теплогенерации имеют существенные экологические ограничения и экономические издержки из-за особо охраняемого статуса ЦЭЗ БПТ. Поэтому в основных направлениях по уменьшению загрязнения центральной экологической зоны и повышению надежности теплоснабжения населенных пунктов актуальна альтернатива замены энергетического углеводородного топлива по причинам отрицательных экологических и инфраструктурно-экономических последствий на экологически чистую малозатратную низкопотенциальную первичную тепловую энергию, неисчерпаемыми запасами которых располагает Байкальская рифтовая зона (БРЗ) в виде геотермальных ресурсов (ГР). В БРЗ тепловой потенциал ГР доступен современным технологиям и достаточен для теплоснабжения крупных административных, производственных и рекреационных объектов. Экономическая выгода и целесообразность такой замены подтверждена технико-экономическими расчетами по нормативам энергоэффективности и энергосбережения [23, 27]. В исследованиях водных ресурсов Байкальского региона [13, 15, 16, 22] изучены основные месторождения природных горячих минеральных вод с оценкой перспективности их геотермальных ресурсов. При существующем дефиците теплоэнергетических и бальнеологических водных ресурсов в инфраструктурно освоенном и инвестиционно привлекательном Иркутском южном Прибайкалье необходимо применение комплексного подхода к эффективным поискам термальных вод. Актуальность проблемы повышается тем обстоятельством, что все эксплуатируемые запасы термальных вод, в том числе и лечебных, находятся за пределами Иркутской области. Задача включала применение конкретных поисковых, исследовательских методов геолого-геофизического профиля для прогнозной оценки запасов геотермальных ресурсов, востребованных в регионе. Работа выполнена на средства бюджета при финансовой поддержке по проектам РФФИ 12-05-98012-р_Сибирь-а, 14-05-00245, при содействии Министерства природных ресурсов Иркутской области и заинтересованности частного инвестора группой исполнителей от Институтов геохимии, географии, земной коры ИНЦ СО РАН и Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск.

Обоснование района исследований. При современной геодинамике Байкальская рифтовая зона выделяется увеличенными значениями гравитационных,

геоэлектрических, сейсмологических характеристик и высоким тепловым потоком, формирующим ее геотермальные ресурсы. Региональный тепловой поток Байкальского рифта (рис. 1, А) [1, 10, 18, 19] создает контрастную термоаномалию БРЗ между Сибирской платформой и Центрально-Азиатским складчатым поясом (см. рис. 1, Б), продуцирующую высокие приразломные теплопотоки, геотермальные поля и поверхностные выходы гидротерм. Аномально повышенные теплопотоки распределяются по крупным региональным сейсмо- и термоактивным разломам [19]. Кроме выделенных 44 термоактивных разломов на 28 разломах также зафиксировано повышение поверхностного теплового потока (ППП) (рис. 2). Региональный тепловой поток Байкальской рифтовой зоны превышает 60 мВт/м^2 . В южном Приангарье он составляет 40 мВт/м^2 и более [17, 18].

Глубоко залегающие пластовые и трещинные воды термальных месторождений по южной периферии оз. Байкал и западнее во впадинах БРЗ формируются на глубинах 2,4–5,2 км [5]. Водные запасы на освоенных термальных объектах и перспективных площадях контролируются структурами пересечения крупных региональных сейсмо- и термоактивных разломов сопутствующими поперечными сбросами. Месторождения термальных вод пространственно ассоциированы с приразломными региональными аномалиями поверхностного уходящего инфракрасного излучения протяженностью до сотни километров и более [2, 4] (см. рис. 2). Подводный разлом-сброс Черского с аномально повышенным донным тепловым потоком [5] ограничивает с севера Муринско-Выдринскую депрессию, являющуюся краевой наземной частью южной впадины оз. Байкал, перспективную для поисков. Протяженная региональная Тункино-Байкальская аномалия инфракрасного излучения объединяет выходы региональных Южно-Тункинского, Главного Саянского и Южно-Байкальского разломов (ЮБР). Блок соединения разломов и их пересечения в контуре ИК аномалии, включающий Муринско-Выдринскую депрессию (см. рис. 2), выделен как район для поисков подземного геотермального месторождения.

Методика. В геологической ситуации краевой части рифтогенной Муринско-Выдринской депрессии для изучения состава и особенностей предполагаемой подземной структуры размещения термальных вод необходим комплекс методов с использованием тепловых, электромагнитных и геохимических свойств горных пород. Контрастному повышению интенсивности уходящего поверхностного ИК-излучения придается региональное поисковое значение и применение тепловой космической съемки (ТКС) [6]. Электроразведка успешно используется для поисков геотермальных резервуаров, так как температура и солевой состав воды влияют на значения удельного электрического сопротивления обводненных и водонасыщенных

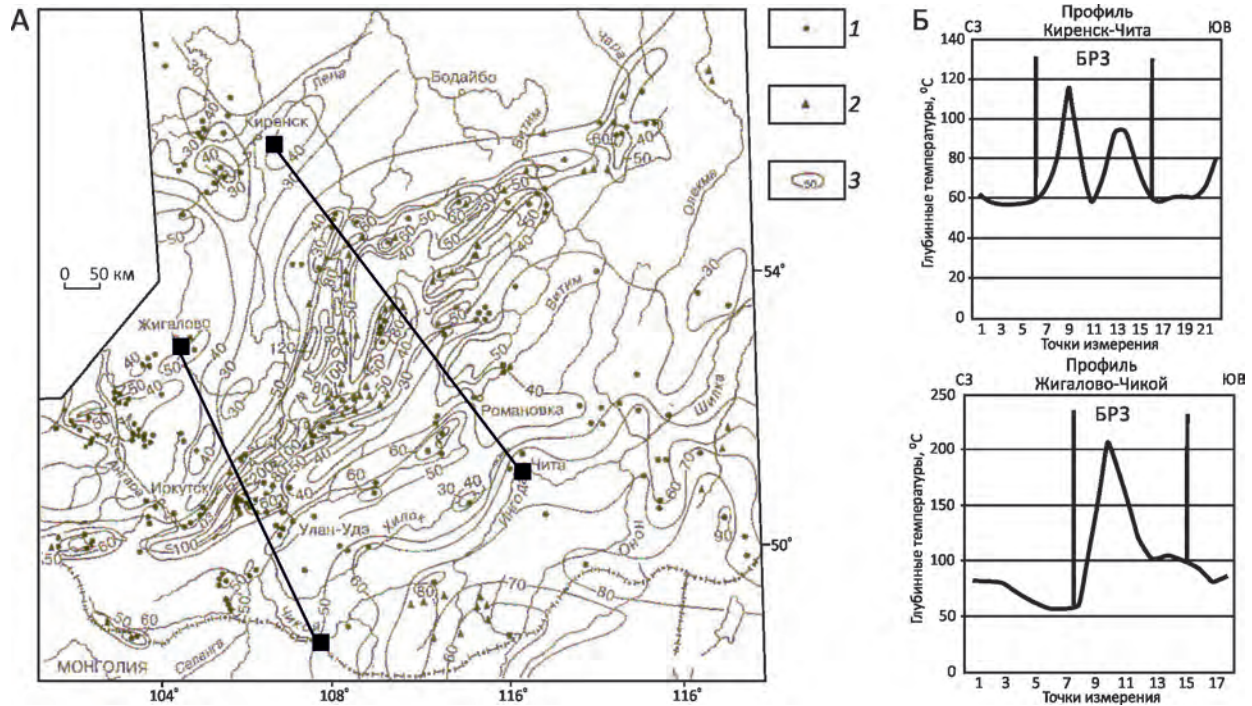


Рис. 1. Региональная геотермальная аномалия теплового потока Байкальской рифтовой зоны. С использованием работ [1, 10, 18, 19]:

А – карта теплового потока Байкальской рифтовой зоны; Б – величины теплового потока по линиям – сечениям: Киренск–Чита и Жигалово–Чикой; 1 – пункты измерения; 2 – месторождения термальных вод; 3 – тепловой поток, мВт/м²; показаны линии – сечения распределения величин теплового потока

пород, и эта зависимость является определяющим поисковым фактором для обнаружения минерализованных вод [11, 29]. Выявление ореольных тенденций распределения групп подвижных рудных элементов как геохимических индикаторов эндогенных процессов при региональных геохимических исследованиях Байкальской природной территории [3], а также на гидрогеологических массивах и геотермальных полях [4] обуславливает привлечение геохимического метода в поисковых целях.

Методика тепловой космической съемки [6] является эффективной на региональном этапе поисков при определении интенсивности уходящего поверхностного инфракрасного излучения тектонических разломов с высоким тепловым потоком, так как дает количественную оценку приразломных поверхностных теплотерь. На сенсорных изображениях поверхности, полученных искусственными спутниками Земли серий NOAA и TERRA-EOS по тепловым каналам 8 и 10–11 мкм от радиометров AVHRR и MODIS из базы данных станции приема спутниковой информации Восточно-Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья (ВСНИИГГиМС) Федерального государственного унитарного научно-

производственного геологического предприятия «Иркутскнефтегеофизика», по программному комплексу ENVI. 4 на профилях подспутниковой территории измерена интенсивность уходящего поверхностного инфракрасного ИК-излучения. Рассчитан поверхностный тепловой поток F , ПТП с размерностью (мВт), соответствующий эффективному тепловому излучению поверхности разломов. В ПТП методом баланса выделены компоненты составляющих долей от почв и грунтов – F_{zp} , конденсации водяного пара – $F_{кон}$, окисления почвенно-грунтовых газов – $F_{фх}$, тепла из верхней коры – $F_{зл}$ и вклада лесных экосистем в гумидных областях – $F_{эс}$. Доля глубинной компоненты $F_{зл}$ определена как разность:

$$F_{зл} = F - (F_{zp} + F_{кон} + F_{фх} + F_{эс}). \quad (1)$$

На разломах с повышенной интенсивностью поверхностного ИК-излучения рассчитаны доли кондуктивной $F_{конд}$ и конвективной $F_{конв}$ составляющих потока [4, 26]. В восходящей ветви теплообменного цикла приповерхностной части разломов преобладает конвективный теплоперенос. На подспутниковой территории температуры грунтов до глубины 1,5 м получены штанговым электротермометром DTS 1500 с шагом между точками измерения 250 м.

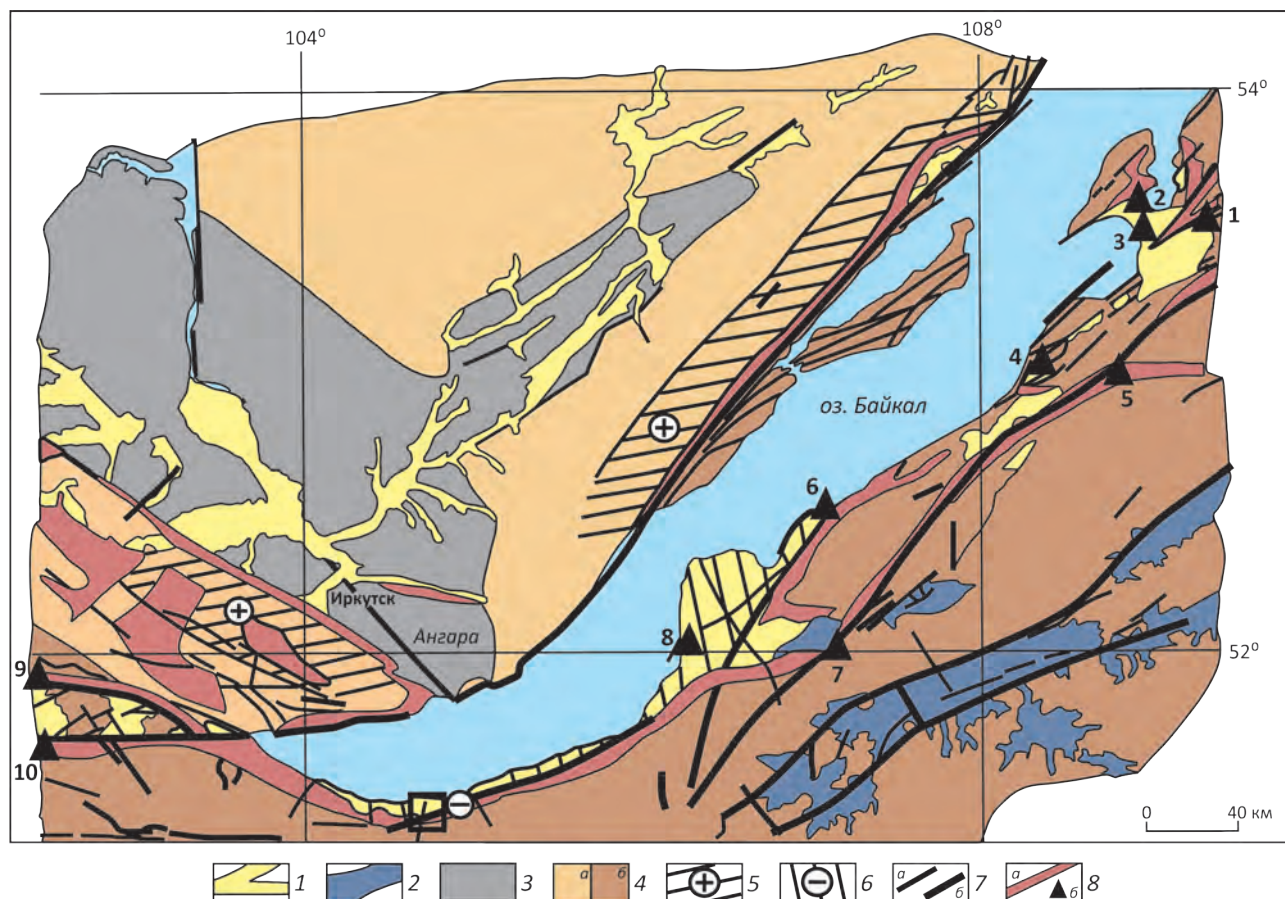


Рис. 2. Блоковая структура и термоактивные элементы Байкальской рифтовой зоны. С использованием работ [18–20]:

1–2 – депрессии: 1 – кайнозойские, 2 – мезозойские; 3 – юрский предгорный прогиб; 4 – нижний палеозой и более древние магматические и метаморфические образования: а – Сибирская платформа, б – Центрально-Азиатский складчатый пояс и Амурская платформа; 5–6 – подвижные блоки с современными перемещениями: 5 – поднимающиеся, 6 – погружающиеся; 7 – разломы: а – установленные, б – крупные региональные сейсмо- и термоактивные; 8 – приразломные региональные аномалии уходящего поверхностного ИК-излучения (а), месторождения термальных минеральных вод (б); прямоугольник – район исследований

Электромагнитные измерения в Муринско-Выдринской депрессии при исследовании подземной структуры поверхностных отложений для поисков скрытого геотермального резервуара проведены методом зондирования становлением поля ближней зоны в варианте метода переходных процессов (ЗСБ-МПП) и электромагнитного зондирования с вызванной поляризацией (ЭМЗ ВП) [7, 8, 12]. Метод ВП успешно используется в гидрогеологии [11] с привлечением эффекта поляризуемости, зависящего от минерализации подземных вод [14, 29]. С учетом стратиграфической схемы на основе 6-слойной модели рассчитан и воспроизведен геоэлектрический разрез до глубины 600 метров. В наземной магнитной съемке и измерениях естественной радиоактивности пород применялись магнитометр ММП-203 и радиометр СРП-68-01.

В геохимическом методе использовано изучение распределения концентраций рудных химических элементов, в том числе природных геотоксикантов As, Tl, Hg в поверхностных отложениях на перспективной приразломной зоне [4]. Покровные образования на разломах опробованы по системе профилей с отбором образцов массой до 500 г в почвах (перегнойно-аккумулятивный горизонт А), подпочвенных грунтах и коренных породах. В озерных отложениях образцы получены из мелких скважин глубиной до 1,2 м. Измерения температуры грунтов сопровождалась геохимическим опробованием. На участке поисков расположение проб на профилях соответствовало сети 300×300 м. В аттестованных лабораториях ИГХ СО РАН сорбционно-активные фракции почв и грунтов –0,1 мм изучены методами: РФА, оптическим, эмиссионным, спектральным

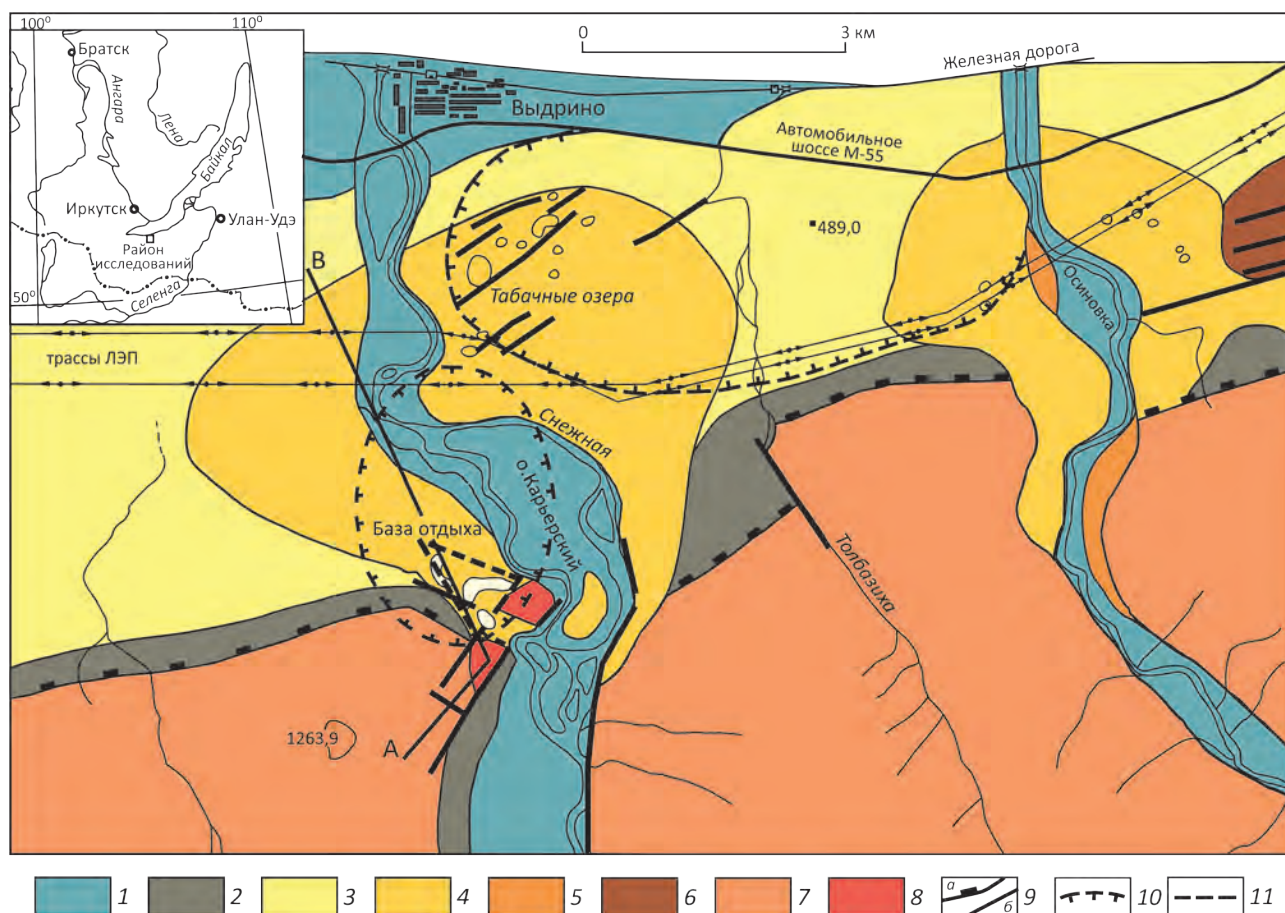


Рис. 3. Геологическая схема краевой части Муринско-Выдринской депрессии:

1–6 – поверхностные отложения, кайнозой: 1 – аллювий, 2 – делювий, суглинки, суглинки с гравием и дресвой, 3 – переотложенный флювиогляциальный валунно-галечно-глинистый материал, 4 – ледниковые отложения, морена, 5 – шанхайхинская свита, мелковалунные галечники, пески, 6 – танхойская свита, тонкослоистые пески, алевролиты, угленосные отложения; 7–8 – фундамент: 7 – верхний рифей: гнейсы, мигматиты корниловской свиты хамар-дабанской серии, 8 – биотитовые, лейкократовые граниты, пегматиты; 9 – разломы: а – ЮБР, б – сопутствующие сбросы; 10 – повышение температуры грунтов; 11 – участок поисков геотермального резервуара; А–В – геологический разрез; на врезке – расположение района исследований

и атомно-абсорбционным. В пробах воды из водоемов и водных источников проведен общий химический анализ, включая распределение Hg. Концентрации рудных элементов-микропримесей определены методом ICP MS. Полевые геолого-структурные наблюдения сопровождалось изучением дополнительных материалов радарной съемки поверхности ИС ALOS-Palsar и COSMO-SkyMed.

Результаты. Трассы термоактивных разломов отслеживаются непрерывными максимумами интенсивности уходящего ИК-потока, значения которого достигают 55 мВт/м²·ср·мкм в диапазоне 8,2–10 мкм (по данным ИС NOAA, спутники 16, 18, сенсор AVHRR) и ИС системы TERRA-EOS с сенсором MODIS в том

же ИК-диапазоне [2, 4, 26]. Сейсмо-, термоактивные разломы ограничивают подвижные периферические блоки южной рифтовой впадины оз. Байкал с вертикальными скоростями перемещения на протяжении от голоцена до 30 мм/г (см. рис. 2). На южной и юго-западной погружающейся части Муринско-Выдринской депрессии шириной до 13 км пологая ступенчатая прибрежная холмистая равнина соединяется с крутым тектогенным склоном передового хребта горной системы Хамар-Дабана (рисунки 3, 4). Край депрессии ограничен сместителем регионального сейсмоактивного Южно-Байкальского разлома с субширотным простиранием. Геологическая структура депрессии сформирована литологическими формациями: кайнозойской,

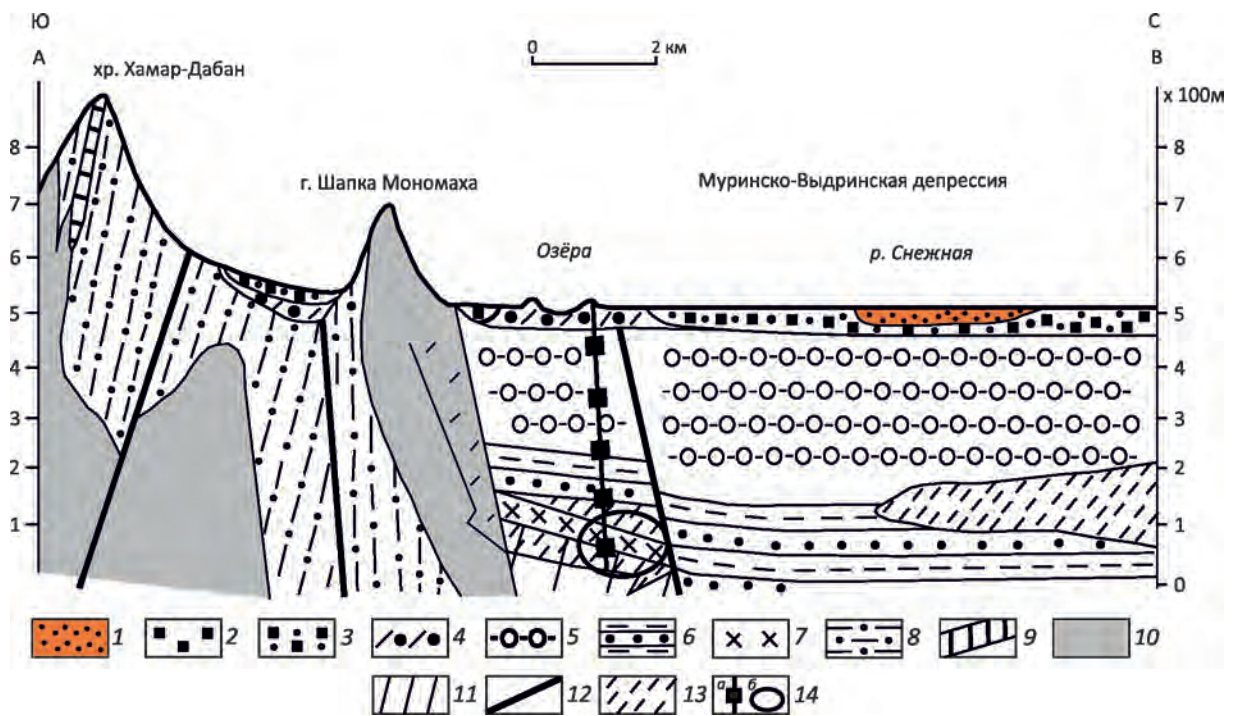


Рис. 4. Геологический разрез краевой части Мурынско-Выдринской депрессии по линии А–В:

1–5 – четвертичные отложения: 1 – аллювий, 2 – материал подножий склонов, пролювий, 3 – отложения водно-ледниковые, 4 – отложения ледниковые, морена, 5 – шанхайхинская свита, мелковалунные галечники, пески; 6 – верхнетретичные отложения, танхойская свита, переслаивание слабо угленосных песков, алевролитов; 7 – мел–палеоген, кора выветривания; 8–10 – блок хр. Хамар-Дабан: 8 – верхний рифей, корниловская свита, гнейсы, мигматиты, 9 – слои мраморов, 10 – хамардабанский интрузивный комплекс: граниты лейкократовые, биотитовые, пегматиты; 11 – фундамент депрессии; 12 – разломы; 13 – направление гидравлического напора; 14 – рекомендуемая поисковая буровая скважина (а), предполагаемое расположение геотермального резервуара (б)

континентальной – в осадочном чехле и верхнерифейской, метаморфической – в фундаменте и массиве Хамар-Дабана. Их разделяет мел-палеогеновая кора выветривания предбайкальского пенепплена, представленная реликтами в южном Прибайкалье [21, 26] (табл. 1). В южном направлении от берега оз. Байкал пояс прибрежно-аллювиальных отложений и долинного аллювия рек Снежная и Осиновка сменяется преобладающими флювиогляциальными и ледниковыми отложениями предгорной равнины. На ней степень преобразования рельефа конечных морен увеличивается в западном направлении. Несортированный валунно-глыбовый материал морены сменяется делювиально-пролювиальными суглинками и глыбово-обломочными шлейфами вдоль подножья передового хребта. Срединная часть депрессии сложена толщей грубого переслаивания мелковалунных галечников и крупнозернистых песков, относимых к шанхайхинской свите эполейстоцена [21]. В восточной части планшета расположены подстилающие тонкослоистые песчано-глинистые отложения с углефицированными фрагментами растительного

детрита танхойской свиты неогенового, миоценового осадочного комплекса [21], к югу перекрытые морской, а к северу – флювиогляциальными отложениями. На площади поисков термальных вод глубина их залегания более 200 м (см. рисунки 3, 4).

Метаморфическая формация фундамента и горного массива хребта представлена гранат-биотитовыми гнейсами с графитом корниловской свиты хамардабанской серии верхнего рифея, соответствующими амфиболитовой фации (изограда силлиманита) зонального хамардабанского метаморфического комплекса, с отдельными 15–20 м прослоями мраморов. В гнейсах расположены мигматиты, автохтонные тела биотитовых гранитов и аллохтонные лейкограниты хамардабанского интрузивного комплекса. На хребте в метаморфитах залегают жилы и мелкие интрузии блоковых, зональных и миароловых пегматитов одноименного пегматитового пояса. Лейкограниты, содержащие гранат-альмандин и шерл, включают субдайкиовые порфировидные разновидности и метасоматические олигоклазиты с крупными шлирами биотита.

1. Стратиграфическая колонка покровных отложений и фундамента Муринско-Выдринской депрессии

Эра	Система	Отдел	Комплексы, свита	Мощность, м	Литологический состав
Кайнозойская	Четвертичная	Голоцен	Современный	не более 15	Аллювий: русла, поймы, террасы
				до 12	Делювий, пролювий: суглинки, глыбы, обломки
		Ранний		до 30	Флювиогляциал, переотложенная морена
				до 50	Конечные, краевые морены: пески, супеси, суглинки, валунно-глыбовый материал
	Третичная	Эоплейстоцен	Шанхаихинская свита	до 300	Пески, мелковалунные галечники, валунники
			Танхойская свита	100–200	Тонкослоистые пески крупно-, мелкозернистые глинистые, алевролиты
			200–300	Тонкослоистые глинистые пески, угленосные алевролиты	
Мезозойская	Мел (?)	Палеоген+ мел (?)	Пенеппен	до 60	Кора выветривания на субстрате фундамента, валунники, галечники, крупнозернистые пески
Протерозойская	Верхний рифей–венд	Хамар-дабанская серия	Корниловская свита	800–1000	Гранат-биотитовые гнейсы с силлиманитом, кордиеритом и графитом, мигматиты, прослойки среднезернистых полосчатых мраморов

Тектоническая структура краевой части депрессии сформирована на пересечении Южно-Байкальского разлома со Снежинским и сопутствующими сбросами (см. рис. 3). На юго-западном крае депрессии, совмещенном с зоной сместителей ЮБР, распространен особый рельеф отчлененных гор-отторженцев в виде раздвинутых островершинных массивов. Смещенное тектоническое происхождение этих блоков отмечено в [24]. Ущелье р. Снежная заложено по зоне тектонической трещиноватости Снежинского сброса. Небольшие сбросы, сопутствующие ЮБР, ограничивают выступ пород танхойской свиты и распределяют мелкие грабены с термокарстовыми озерами. Современная сейсмическая активность проявлена новейшими сбросовыми сейсмодислокациями на северной границе Южно-Байкальской сейсмической зоны с эпицентрами 9-балльных землетрясений по шкале MSK-64 [28] и сопутствующими полями катастрофических обвалов и селей в ущелье р. Снежная.

Интенсивность уходящего поверхностного ИК-излучения, представленная значениями яркостной температуры ($T_{\text{ярк}}$), является измеряемым параметром термоактивности Южно-Байкальского разлома (рис. 5). Центральная термозона с наибольшими $T_{\text{ярк}}$ и, соответственно, поверхностным ИК-теплопотоком в основании хребта Хамар-Дабан и на его передовом склоне располагается по сместителю ЮБР в виде протяженного регионального поверхностного ИК-термомаксима. Температуры грунтов измерены по его северной границе на пересечении ЮБР поперечным Снежинским сбросом (см. рисунки 3, 4, 5). Из первичной выборки 65 измерений при анализе распределения повы-

шений грунтовых температур на графике зависимости «температура, $T^{\circ}\text{C}$ – глубина, h , м» получена группа точек с трендом:

$$T^{\circ}\text{C}_{\text{грунт}} = 7,9566 \cdot h^{0,8208} \quad (2)$$

со средним значением $T^{\circ}\text{C}_{\text{грунт}} = 8,27 \pm 1,1^{\circ}\text{C}$ и коэффициентом корреляции $r = 0,55$, статистически выделяющая локальное превышение температуры грунтов в 2 точках на границе центральной термозоны и в 17 точках грунтов между реками Снежная и Осиновка (см. рис. 3).

Грунтовые воды залегают в верхних, а предполагаемые термальные воды по аналогии с соседствующим Усть-Селенгинским артезианским бассейном [25] в глубинных частях разреза кайнозойских отложений Муринско-Выдринской депрессии. При водоснабжении используются воды, получаемые из скважин глубиной от 10 до 30 м, не выходящих за пределы мощности голоценовых флювиогляциальных и моренных отложений. Распределение водоносных горизонтов в этой части разреза, определенное методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) (табл. 2), ограничивается водоупором на глубине более 50 м. Природные воды депрессии существенно различаются по водородному показателю pH, содержанию растворенного кремнезема, ионов гидрокарбоната и кальция, минерализации и электропроводности соответственно их происхождению. Анализ состава и свойств природных вод приведен в [26]. Подземные воды зон разломов содержат повышенные концентрации В, Hg, As. В приразломных карстовых гидрокарбонатно-кальциевых водах с минерализацией 400 мг/дм³ и более концентрации ртути увеличиваются до 0,042 мкг/дм³.

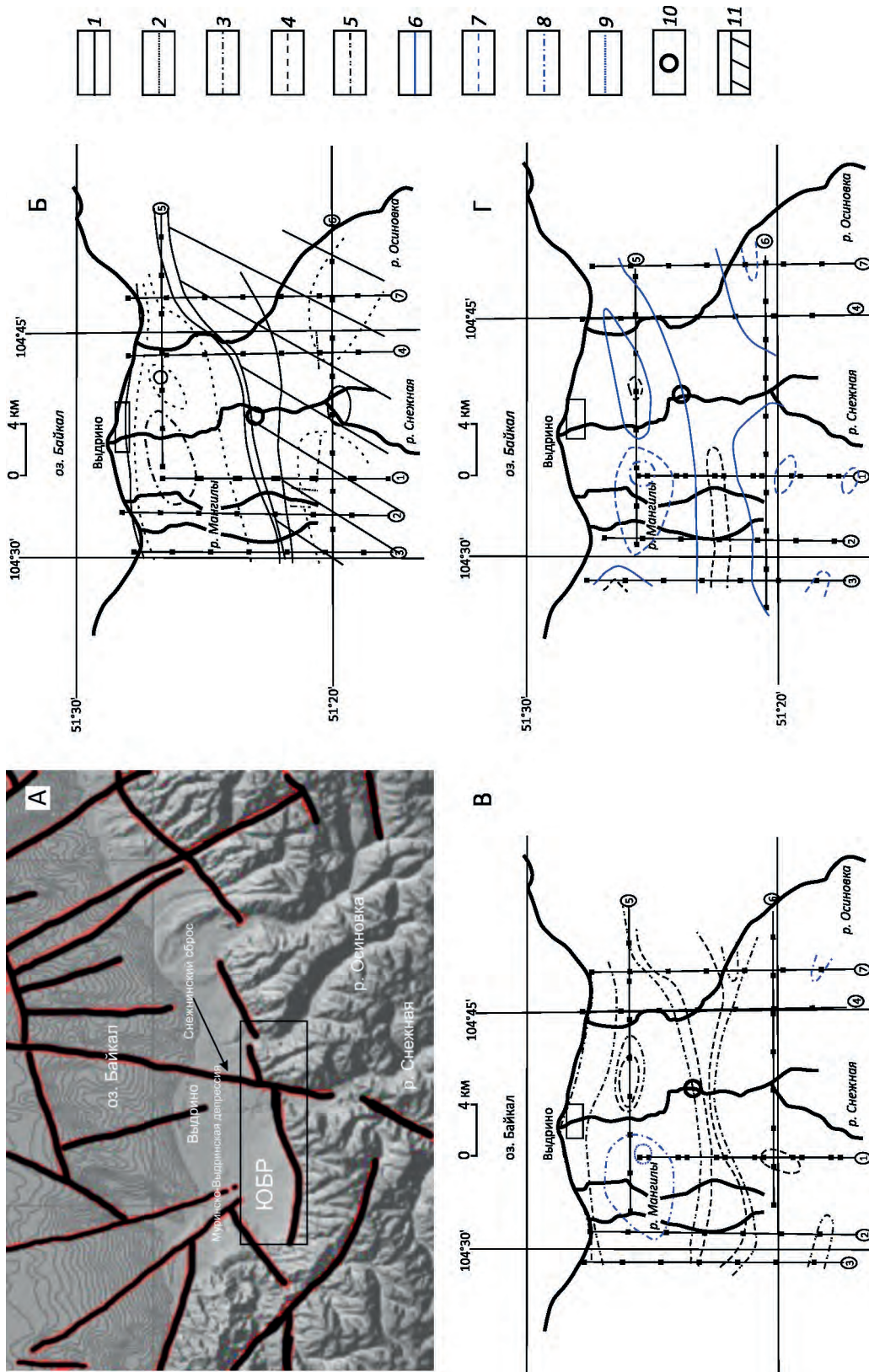


Рис. 5. Схема распределения ярких температур аномалий инфракрасного поверхностного излучения Южно-Байкальского регионального разлома на южном кон-
туре Муринско-Выдринской депрессии по данным ИС EOS:

А – структура разломов депрессии [20]; прямоугольник – участок проведенных исследований; Б – сцена измерений в пролете 4.10.2012 г.; В – сцена измерений в пролете 14.11.2012 г.; Г – сцена измерений в пролете 8.12.2012 г.; 1–8 – изотермы яркостной температуры, К: 1 – 275, 2 – 273, 3 – 270, 4 – 253, 5 – 252, 6 – 245, 7 – 240, 8 – 239; 9 – но-
вейшие сейсмодислокации; 10 – северная граница сейсмоактивной зоны; 11 – участок поисков геотермального резервуара электромагнитными методами; линии с цифрами в
кружках соответствуют профилям измерения яркостной температуры поверхности по данным ТКС; точки – пункты определения $T_{\text{ярк}}$.

2. Геоэлектрическая дифференциация морены и флювиогляциала по данным ВЭЗ

УЭС, Ом·м	Глубина залегания слоя, м	Мощность слоя, м
338	1,1	0,5
52	2,4	1,3
1165	6,7	4,4
154	13,8	7
1009	16,5	30,3
145	55,3	25
2833	60	>20

Водные растворы, дренирующие зону Южно-Байкальского разлома, содержат повышенные концентрации В, Нg, As. В воде моренного озера на сместителе разлома повышены содержания как петрогенных компонентов (литий, бор, алюминий, фосфор, барий), так и подвижных рудных элементов (бериллий, ванадий, хром, марганец, железо, кобальт, никель, германий, мышьяк, серебро, кадмий, таллий, свинец и вольфрам). Вследствие водопритока по разлому в озерной воде десятикратно увеличены концентрации Mn, Be, As и более чем двукратно у Cd, Co, Sb, Bi, Tl, F, а в донных илах – содержания As, Нg, Cl, Вг. В пробах грунтов вдоль Южно-Байкальского разлома (см. рис. 3) увеличены содержания ртути, мышьяка и бора, а также свинца и цинка. В торфах увеличиваются концентрации меди, ртути и таллия, а в донных илах – бора, свинца, олова и серы. Зона разлома, ограничивающая депрессию, на поперечных профилях (см. рис. 3) фиксируется контрастом γ -радиоактивности. При пересечении трассы сместителя ЮБР γ -радиоактивность повышается от пород осадочного чехла с $\gamma=8,87$ мкр/час $\pm 0,33$ до $11,62\pm 0,65$ мкр/час в гнейсах корниловской свиты

риффея, слагающей выход фундамента на передовом склоне Хамар-Дабана. Напряженность магнитного поля (Н), измеренная в поперечных профилях, при изучении структурной неоднородности на сместителе разлома (см. рис. 3) достигает 600 030 нТл (наноТесла). Это на 150–270 нТл выше, чем в крыльях нарушения с образованием протяженной приразломной зоны увеличений напряженности шириной до 300 м.

В принятой физико-геологической модели горизонтально слоистой среды осадочного чехла и верхней части фундамента при интерпретации данных электромагнитных методов использовано распределение величин удельного электрического сопротивления (УЭС) по литологическим разновидностям разреза (см. табл. 1). Геоэлектрические параметры модели включают кроме УЭС (ρ , Ом·м), поляризуемость (η , %) и время релаксации (τ , сек) (табл. 3). С измеренными параметрами разреза и базой данных в программном комплексе «MARS 1D» рассчитаны функции для геоэлектрических разрезов (рис. 5), представленные в значениях логарифмов ρ , η и τ по профилям над областью повышенной проводимости пород на границе фундамента и осадочного чехла.

Горизонт с сопротивлениями в пределах $60\div 20$ Ом·м на глубинах от 200 до 400 м содержит локальные понижения УЭС до $10\div 6$ Ом·м на северо-западном и юго-восточном краях профилей измерения (рис. 6). Он перекрыт высокоомными галечниками, мореной и флювиогляциальными отложениями. В юго-восточной части разреза на глубине 300–400 м расположен блок пород протяженностью до 300 м с УЭС от 20 до 6 Ом·м и ниже с поляризуемостью менее 20–10%. Ниже 400 м в фундаменте чередуются блоки с УЭС=3000–4000 Ом·м и более проводящие, в которых $\rho=60$ –100 Ом·м при значительном снижении поляризуемости. 200-метровый интервал разреза с минимальными значениями ρ и η представлен обводненными

3. Геоэлектрические параметры модели

Литология слоя	Пределы изменений УЭС, в знаменателе – применяемое значение, Ом·м	η , %	τ , сек	c	H , м
Глыбово-обломочный валунник, супеси, суглинки	$\frac{90-2000}{1000}$	60	0,01	0,5	80
Галечники, пески	$\frac{80-500}{250}$	30	0,01	0,5	150
Глинистые слоистые пески, слабоугленосные суглинки	$\frac{10-50}{50}$	10	0,01	0,5	250–300
Мелковалунные галечники, грубозернистые пески	$\frac{5-800}{500}$	20	0,01	0,5	50
Гранат-биотитовые гнейсы, слабо графитизированные	$\frac{100-3000}{1000}$	50	0,01	0,5	200
Гнейсы с рассеянной вкрапленностью пирротина	$\frac{50-1500}{200}$	80	0,01	0,5	200

Примечание. c – показатель степени в формуле Коула-Коула (Cole-Cole) [11, 14], H – мощность слоя.

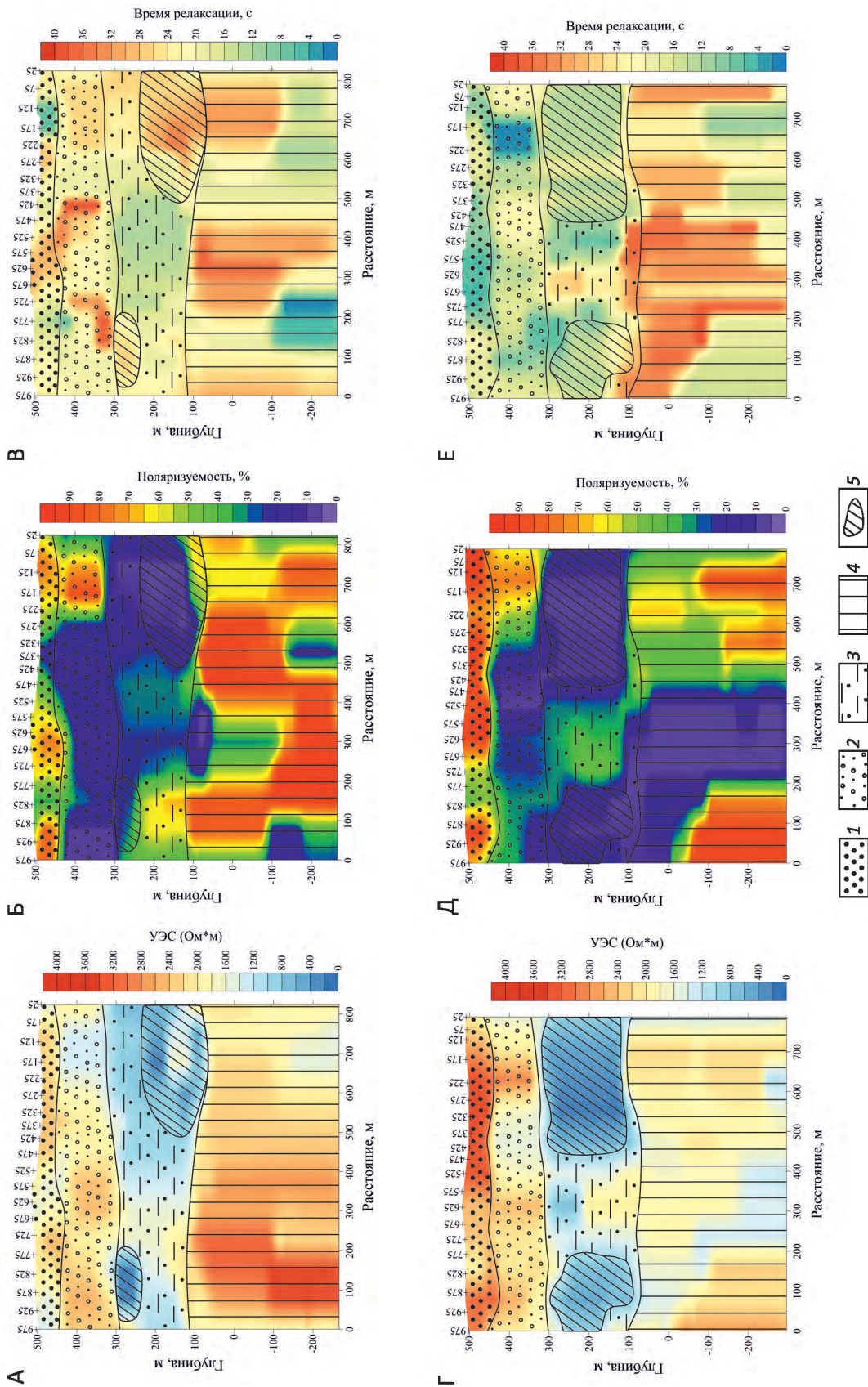


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы на участке поисков:

А, Г – распределение значений удельного электрического сопротивления; Б, Д – распределение значений поляризуемости; В, Е – распределение значений времени релаксации; 1–3 – кайнозойские отложения: 1 – флювиогляциальные и ледниковые отложения, 2 – пески, мелковалунные галечники, валуники, шанхайнская свита, 3 – тонкослоистые глинистые, мелко- и среднетернистые пески, слабо угленосные алевролиты, танхойская свита; 4 – фундамент, рифей, хамардабанская серия, корниловская свита, гнейсы, мигматиты, отдельные прослои мраморов; 5 – блоки, содержащие минерализованные воды; остальные услов. обозн. см. рис. 3

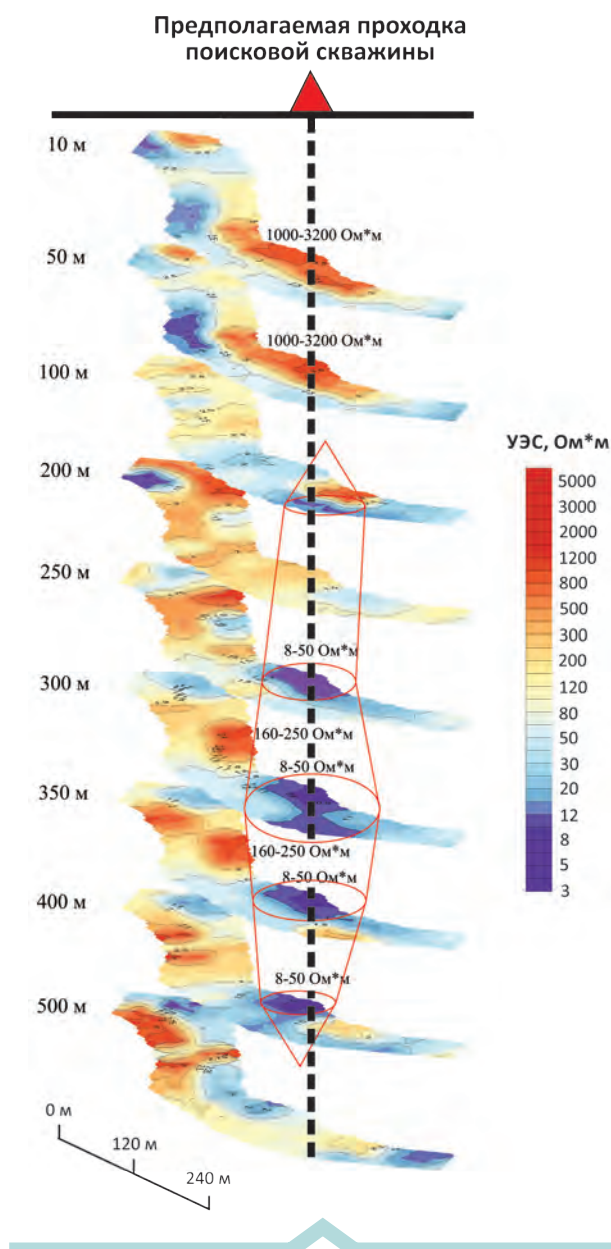


Рис. 7. Пространственное расположение геотермального резервуара в блоке с минимальными удельными сопротивлениями:

пунктир – ствол рекомендуемой поисковой буровой скважины

неогеновыми отложениями и трещинным подземным геотермальным резервуаром в приразломной зоне, термальность которой подтверждена данными ТКС и наземными измерениями. «Островное» снижение поляризуемости в подморенных галечниках с УЭС около 600–700 Ом·м обусловлено дискретным присутствием линз пресных грунтовых вод.

Эффективность методов, использованных для оценки геотермальных ресурсов. При геологической съемке и электромагнитных исследованиях установ-

лено, что кровля отложений неогена в блоке западной части Муринско-Выдринской депрессии погружена на 270–300 м при скорости опускания 11–25 мм/г, определенной по степени переработки раннеголоценового моренного рельефа (см. рисунки 2, 3). На границе с сопряженным поднятым массивом хр. Хамар-Дабан вдоль трассы Южно-Байкальского разлома расположена региональная приразломная Южно-Байкальская аномалия уходящего поверхностного ИК-излучения. В районе локализации подземного термального резервуара ширина центральной термозоны контрастно сужается до 1–2 км (см. рисунки 3, 5) при увеличении плотности уходящего теплового потока до удельной мощности 14,435 кВт/км². На фронте центральной термозоны температуры грунтов на глубине ≥ 1 м превышают на 3,5–4°C температуры фона грунтов предгорной равнины. Зависимость логарифма контрастности уходящего поверхностного ИК-потока – $\lg K_{нт}$, Вт/км на термомаксимум, равно отношению мощности потока к ширине экстремума от сейсмичности Sm (балл), по шкале MSK-64 [28] выражается корреляционным уравнением:

$$\lg K_{нт} = -0,0504Sm^2 + 0,8357Sm - 6,6196. \quad (3)$$

Увеличение сейсмоактивности повышает интенсивность уходящего поверхностного ИК-потока с увеличением поверхностного теплового потока до 371 мВт и проявлением сопутствующих геохимических потоков мышьяка, таллия и ртути до 2,273, 0,275 и 0,007 кг·км²/год соответственно, которые являются аномальными приразломными геохимическими индикаторами и отмечают поверхностную проекцию подземного геотермального резервуара, локализованного в низах неогеновой осадочной толщи на границе с фундаментом.

Объем резервуара, выделяемый по структуре распределения значений УЭС (рис. 7), содержит зону увлажнения ($\rho \leq 20$ Ом·м) с кровлей на глубине около 150 м и проводящую зону обводнения ($\rho \leq 10$ Ом·м) в интервале глубин 275–400 м. К северо-западу располагается меньший по размерам объем проводящих пород. В кровле гнейсогранитного фундамента при глубине более 450 м проявлен соседний блок низких УЭС. Геоэлектрические свойства проводящих блоков обусловлены повышенной трещиноватостью пород, содержащих минерализованные термальные воды. Вмещающий трещинно-поровый коллектор, залегает под моренным холмом (см. рис. 4) в глубинной части разреза неогена с низким УЭС. «Корневая» часть резервуара проникает по трещиноватости в фундамент на 200–300 м (см. рисунки 6, 7). Параметры измерений (ρ , η и τ) отображают структурно неоднородный гнейсовый массив с обводненными трещинными зонами. В четвертичных отложениях холодные пресные грунтовые воды приурочены к песчано-галечным линзам с повышенной ρ и малой поляризуемостью η .

Зона увлажнения в кровле геотермального резервуара расположена на глубине около 175 м (см. рис. 6),

а водосодержащий блок с $\rho \leq 8$ Ом·м находится ниже 250 м при вертикальной протяженности до 420–430 м. Рассматриваемая часть резервуара аппроксимируется как цилиндроид эллипсовидного сечения при среднем диаметре $121 \pm 15,6$ м и объеме $853\,125$ м³. Рассчитанный коэффициент пористости обводненного блока получен по соотношению параметра пористости (P_n), предложенному в работе [9]:

$$P_n = \rho_{\text{вп}} / \rho_{\text{в}} \quad (4),$$

где $\rho_{\text{вп}}$ – удельное сопротивление обводнённой породы, $\rho_{\text{в}}$ – удельное сопротивление минерализованной воды. Удельное электрическое сопротивление вод, определенное в источниках горячих минеральных вод центральной экологической и буферной зон Байкальской природной территории [4, 26], равно $1,59 \pm 0,143$ Ом·м, а среднее сопротивление пород в зоне обводнения около $7,94$ Ом·м ($\lg \rho = 0,9$). Вычисленный параметр пористости составляет: $P_n = 7,943 / 1,591 = 4,9924 \approx 5$. Коэффициент пористости k в породах геотермального резервуара 36% определен по стандартным кривым зависимости P_n для сцементированных песчаных коллекторов [9].

В результате проведенного поисково-оценочного изучения рассчитаны количественные показатели запасов резервуара с привлечением метода аналогий по средним параметрам термальных месторождений восточного побережья оз. Байкал и Усть-Селенгинского артезианского бассейна [25]. Прогнозный потенциал подземного термального резервуара включает:

интервал залегания верхней кромки резервуара 100–200 м;

форма для геометризации: усеченно-конусный цилиндроид;

протяженность на глубину 300 м;

средний диаметр $121,38 \pm 15$ м;

средний радиус 60,7 м;

средняя площадь поперечного сечения $11\,575,2$ м²;

объем резервуара $3\,472\,560$ м³;

параметр пористости 5;

коэффициент пористости 36%;

водный запас $1\,250\,121,6$ м³;

масса водного запаса $1\,300\,126,5$ т;

прогнозируемый дебит водопритока $8,6 \pm 4,55$ л/с;

прогнозируемая температура воды 30°C;

прогнозируемый состав воды – азотно-метановый кальциево-натровый бикарбонатно-сульфатный;

прогнозируемая тепловая мощность скважины $539,365$ кВт.

Рассчитанный прогноз приближенно соответствует категории P_3 . В ближайшей перспективе при заложении 500-метровой поисково-эксплуатационной скважины и последующей постановке буровых поисково-оценочных работ с целью изучения запасов всего геотермального месторождения сформируется положительная оценка более масштабных геотермальных ресурсов южного и юго-западного флангов Муринско-Выдринской депрессии.

В заключение следует отметить, что актуальная задача обнаружения подземных месторождений минерализованных и геотермальных вод южного Прибайкалья получает положительное решение в исследованиях с комплексом поисковых методов, включающих структурно-геологический, геохимический, дистанционный способ ТКС и наземные детальные электромагнитные измерения. Подземный блок с рассчитанными прогнозными запасами геотермального месторождения выделен в Муринско-Выдринской депрессии при использовании такого комплекса. Контролирующая тектоническая зона на пересечении субмеридионального Снежинского сброса со сместителем сейсмо- и термоактивного ЮБР содержит приразломный повышенный теплоток, обнаруживаемый средствами дистанционного зондирования Земли, ДЗЗ и массоперенос в геохимических потоках. На выделенной площади по результатам электромагнитных измерений даются прогнозные запасы подземных термальных вод в трещинной области северо-восточного простирания, опирающейся ЮБР. Последующая оценка геотермальных резервуаров в Муринско-Выдринской депрессии связана с проведением буровых работ. Проходка поисковых скважин экономически оправдана вследствие востребованности геотермальных ресурсов и их технической доступности с применением теплонасосных технологий. Задача продолжения изучения термального месторождения актуальна в аспекте развития энергетической инфраструктуры индустриально-рекреационного центра в районе г. Байкальск-пос. Выдрино и в целом для южного Прибайкалья Иркутской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Актуальные* вопросы современной геодинамики Центральной Азии // Под ред. К.Г.Леви, С.И.Шерман. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005.
2. *Вилор Н.В., Минько Н.П.* Инфракрасное излучение Саяно-Байкальской горной области и Байкальской рифтовой зоны по данным спутникового мониторинга // Доклады РАН. 2001. Т. 379. № 5. С. 666–669.
3. *Геохимия* окружающей среды Прибайкалья. Байкальский геоэкологический полигон // В.И.Гребенщикова, Э.Е.Лустенберг, Н.А.Китаев, И.С.Ломоносов. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008.
4. *Геохимия* сейсмоактивных региональных разломов (Байкальская рифтовая зона, Восточная Сибирь) / Н.В.Вилор, Л.Д.Андрулайтис, О.В.Зарубина, Б.С.Данилов // Геохимия. 2015. №1. С. 64–82.
5. *Голубев В.А.* Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007.
6. *Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И.* Тепловая аэрокосмическая съемка. – М.: Недра, 1993.
7. *Давыденко Ю.А.* Перспективы использования индукционной составляющей переходного процесса в традиционных методах постоянного тока // XIV Уральская

- молодежная научная школа по геофизике. Сборник научных материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2013. С. 74–83.
8. Давыденко Ю.А., Попков П.А., Новопашина А.В. Перспективы использования индукционной составляющей переходного процесса в традиционных методах постоянного тока // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 4. С. 73–84.
 9. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. – М.: Недра, 1975.
 10. Дучков А. Д., Соколова Л.С. Атлас геотермических карт Сибири. – Новосибирск, 2000.
 11. Жданов М.С. Электроразведка. – М.: Недра, 1988.
 12. Кожневиков Н.О. Некоторые особенности структуры Приольхонья по данным электроразведки (западное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 2. С. 271–276.
 13. Кустов Ю.И., Лысак С.В. Термальные воды юга Восточной Сибири // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 6. С. 880–895.
 14. Крылов С.С. Геоэлектрика: Поля искусственных источников: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2004.
 15. Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. – Новосибирск: Наука, 1974.
 16. Ломоносов И.С., Кустов Ю.А., Пиннекер Е.В. Минеральные воды Прибайкалья. – Иркутск: Восточно-Сибирское книжное изд-во, 1977.
 17. Лысак С.В. Геотермические условия и термальные воды южной части Восточной Сибири. – М.: Наука, 1968.
 18. Лысак С.В. Тепловой поток континентальных рифтовых зон. – Новосибирск: Наука, 1988.
 19. Лысак С.В. Тепловой поток в зонах активных разломов на юге Восточной Сибири // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 8. С. 791–803.
 20. Лунина О.В., Гладков А.С., Шерстянкин П.П. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири // ДАН. 2010. Т. 411. № 5. С. 662–667.
 21. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.Н. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины. Стратиграфия и геологическая история. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001.
 22. Минеральные воды южной части Восточной Сибири // Под ред. В.Г.Ткачук, Н.И.Толстихина. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1961. Т. 1.
 23. Мороз М.В., Толстой М.Ю., Н.В.Вилор. Вариант конструкции первой в Восточной Сибири геотермальной станции для теплоснабжения курорта «Горячинск» (Бурятия) // Вестник ИрГТУ. 2011. № 9. С. 162–168.
 24. Опасные геологические процессы в юго-западном Прибайкалье // В.К.Лапердин, К.Г.Леви, И.С.Имаев, В.Г.Молочный. – Иркутск, 2016.
 25. Перспективы поисков термальных вод в Усть - Селенгинском артезианском бассейне / П.С.Бадминов, А.В.Мироманов, А.И.Оргильянов и др. // Подземная гидросфера. – Иркутск: Изд-во «ООО Географ», 2012. С. 285–288.
 26. Сейсмическая и геотермальная активность региональных разломов (южное Прибайкалье, Восточная Сибирь / Н.В.Вилор, А.В.Мироманов, М.Ю.Толстой и др. // Геоэкология. 2016. № 2. С. 81–90.
 27. Экономические параметры геотермальной установки теплоснабжения на рекреационном объекте в охраняемой природной зоне / М.Ю.Толстой, Н.В.Вилор, А.В.Соболев, М.В.Мороз // Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. Вып. 12. С. 103–110.
 28. Хромовских В.С. Сейсмогеология южного Прибайкалья. – М.: Наука, 1965.
 29. Spichak V.V., A.Manzella Electromagnetic sounding of geothermal zones. Journal of Applied Geophysics. 2009. Vol. 68. P. 459–478.