

ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ ЗОНЫ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

© 2019 А.А. Петрова, Ю.А. Копытенко

*Санкт-Петербургский филиал ФГБУ Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
199034, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: office@izmiran.spb.ru*

Приводятся результаты исследования зон геотермальной активности на юге Восточной Сибири. С целью изучения глубинного строения земной коры проведен анализ аномалий магнитного поля и силы тяжести. В результате проведенного исследования глубинных разрезов через зоны известных термальных источников и грязевых месторождений сделана оценка зависимости температуры термального источника от глубины залегания подпитывающих флюидных систем. Анализ магнитных и плотностных разрезов юга Восточной Сибири выявил глубинные флюидные системы и специфику гидротермального потенциала региона. На основе моделей распределения намагниченности и плотности построены схемы размещения флюидных потоков на разных уровнях глубин земной коры и намечены пути восходящих термофлюидных потоков к поверхности. Результаты исследования показали, что восходящая миграция флюидов с наименьшими потерями тепла подводит гидротермальные воды к поверхности через вертикальные разломы, секущие кристаллический фундамент в интервале глубин от 2 до 10 км. На основе анализа неоднородностей глубинного строения фундамента составлен прогноз гидротермальных зон для юга Восточной Сибири вблизи перспективных объектов полезных ископаемых.

Ключевые слова: термальный источник, флюидная система, магнитные аномалии.

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является исследование особенностей глубинной флюидной системы юга Восточной Сибири (рис. 1а) и ее гидротермального потенциала. Геотермальная энергия относится к возобновляемым энергетическим ресурсам, области ее проявления приурочены к районам повышенной тектонической активности. Поиск перспективных гидротермальных зон на юге Восточной Сибири проведен на основе анализа глубинного строения земной коры по аномалиям модуля магнитного поля Земли (МПЗ) и силы тяжести в редукции Фая.

Флюид является гидротермальной фазой низкой плотности и вязкости, содержащей в разных пропорциях летучие компоненты воды, водорода, азота, углекислого газа и др. (Киссин, 2009). Он способен переносить и транспортировать химические элементы к поверхности Земли. Флюид на порядок увеличивает скорость процессов минералообразования. Миграция гидротермальных глубинных флюидов к поверхности отражается на структуре геотермического

поля в виде повышенных значений теплового потока (Артюшков, 1993; Бердичевский и др., 1999; Киссин, 2009; Розен, 2003).

Миграция глубинного флюида играет огромную роль в размещении полезных ископаемых и определяет их локализацию. Флюид оказывает влияния на формирование рудоносности гидротермальных залежей рудных и нерудных полезных ископаемых, таких как медно-никелевые, золоторудные, железорудные, апатитовые, алмазные и др. (Наливкина, Петрова, 2018; Petrova et al., 2019) Процесс накопления полезных ископаемых определяется динамикой флюидного потока (Кучеренко, 2013).

Месторождения термальных вод приурочены к каналам флюидной проработки, идущим с глубины 8–13 км и более (Копытенко и др., 2011; Петрищев и др., 2011). При оценке перспектив гидротермальных месторождений наибольший интерес представляет выявление ареалов выхода флюидоподводящих каналов в осадочный чехол за счет восхождения теплового потока из глубин фундамента. Вертикальная миграция флюидов происходит через разломные зоны и трещины,

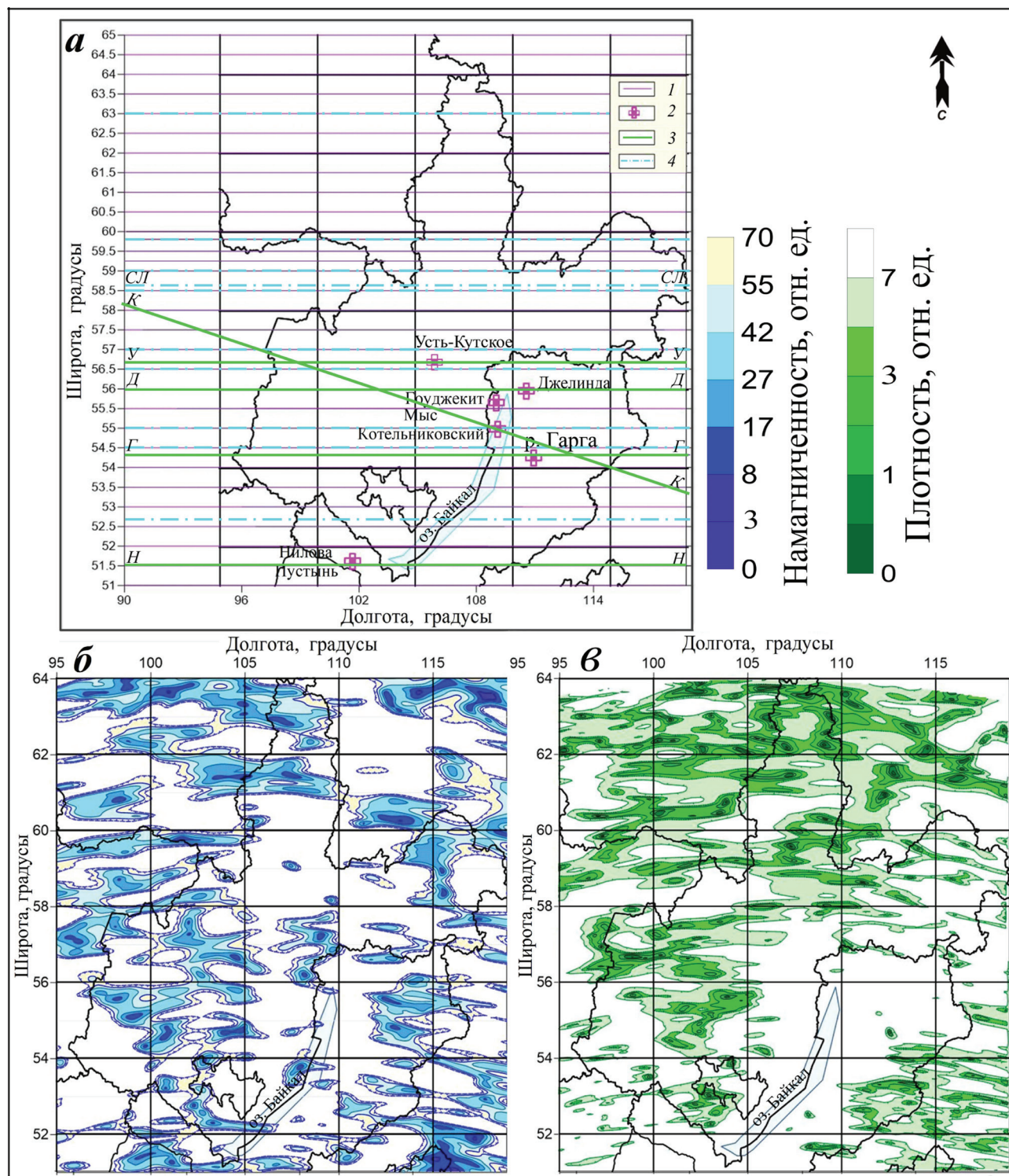


Рис. 1. Схема основных профилей глубинных разрезов (*а*) юга Восточной Сибири. Двумерная модель распределения намагниченности вблизи подошвы верхней коры по аномалиям модуля МПЗ (*б*) и плотности по аномалиям силы тяжести (*в*): 1 — расположение системы основных профилей; 2 — известные термальные источники; местоположение разрезов, представленных на рисунках: 3 — рис. 3, 4; 4 — рис. 2, 6, 8.

Fig. 1. The scheme of the main profiles of deep sections (*a*) in the south of Eastern Siberia. Two-dimensional model of the distribution of magnetization near the bottom of the upper crust along the anomalies of the modulus of the Earth magnetic field (*б*) and density along the anomalies of gravity (*в*) fields: 1 — position of the main profiles system; 2 — known thermal springs. The position of the sections presented in the figures: 3 — Fig. 3, 4; 4 — Fig. 2, 6, 8.

секущие кристаллический фундамент и нижние горизонты осадочного чехла (Петрова и др., 2013; Petrishchev et al., 2013).

Флюидопроводящие каналы в зонах восходящего горячего флюидного потока представляют собой ослабленные зоны с низкой намагниченностью и пониженными плотностными свойствами (Петрова, Петрищев, 2011). Следы миграции потоков тепла и флюидов отражаются в особенностях структуры аномалий магнитного и гравитационного полей. Внутри каналов идет направленное преобразование пород, изменяющее их физические свойства, в том числе магнитные и плотностные. В результате этого процесса пути миграции флюидизированных потоков прослеживаются на глубинных магнитных и плотностных разрезах в виде сквозных и ветвистых треков, секущих разные слои земной коры.

Детальные исследования месторождений гидротермальных вод в России и за рубежом, проведенные нами, подтвердили наличие в земной коре систем ослабленных треков, выстроенных субвертикально, которую можно ассоциировать с каналами флюидной проработки (Копытенко и др., 2011; Копытенко, Петрова, 2011; Petrishchev et al., 2013).

К этим зонам приурочены треки флюидных тепловых потоков с различной температурой, зависящей от глубины залегания основного источника подпитки и высоты залегания верхней мантии в данном районе. Местоположение глубинного источника подпитки прослеживаются по геомагнитным и плотностным разрезам (Петрова, Петрищев, 2011).

В результате выполненных исследований известных проявлений термальной активности на основе интерпретации магнитных и гравитационных данных составлен прогноз распределения термальных зон, представляющих интерес при проведении геологоразведочных работ на поиски и разработку перспективных полезных ископаемых юга Восточной Сибири.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ГЛУБИННЫХ РАЗРЕЗОВ И ДВУМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ И ПЛОТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Визуализация глубинного строения земной коры с помощью физических параметров, таких как плотность, намагниченность, электрическое сопротивление позволяет установить современные границы блоков земной коры, их возможную тектоническую и вулканическую активность, наметить пути флюидоподводящих потоков геотермальных зон. На основе объемного представления намагниченности и плотности горных пород в земной коре по геомагнитным и грави-

метрическим данным возможен поиск долгоживущих термальных источников, месторождений углеводородов и рудных гидротермальных месторождений (Кучеренко, 2013).

Анализ неоднородностей литосферы по магнитным и плотностным разрезам позволяет выявлять гидротермальные зоны, подпитываемые подземными резервуарами большой емкости, зоны нефтегазовых месторождений, области метасоматически измененных пород, перспективных на рудные полезные ископаемые, и флюидно-эксплозивные алмазонасные образования (Копытенко, Петрова, 2011; Литвинова, Петрова, 2013; Лукьянова и др., 2011; Мавричев, Петрова, 2001; Петрова, Мавричев, 2004; Петрова и др., 2013; Litvinova et al., 2014; Lyukianova, Petrova, 2014; Petrishchev et al., 2013; Petrova et al., 2011).

Исследование магнитных и слабوماгнитных неоднородностей земной коры осуществлялся методом спектрально-пространственного анализа (СПАН), позволяющим конвертировать спектрально-пространственное представление аномального поля в глубинный разрез (Петрова, 1976, 1980; Петрова, Колесова, 1986; Литвинова, Петрова, 2013; Петрова и др., 1981; Petrova et al., 1992). Конвертация выполняется на основе экспериментально-теоретической зависимости параметров спектральной структуры аномального поля от глубины залегания тел и по результатам геолого-геофизических исследований сейсмических скоростных разрезов, и данным бурения (Гальбес и др., 1982; Петрова, 1977, 1980; Петрова, Карасик, 1979; Петрова, Колесова, 1986).

СПАН аномального поля вдоль профиля создает спектрально-пространственное представление глубинного разреза в виде матрицы, позволяющей детально исследовать изменения структуры поля вдоль профиля и с глубиной. Большой практический интерес для прогноза полезных ископаемых представляют аномалии, создаваемые слабوماгнитными комплексами пород и горизонтами пониженной плотности в осадочном чехле и фундаменте (Петрова, 1976, 1977, 1980; Петрова, Петрищев, 2011; Petrova et al., 1992).

Разрез дает картину распределения с глубиной относительной намагниченности и плотности пород, создающих аномалии от различных литолого-стратиграфических комплексов (рис. 2). Аномалии от магнитовозмущающих тел и объектов повышенной плотности проявляются в виде областей максимумов на соответствующих периодах и участках профиля. Это позволяет провести идентификацию отдельных комплексов по маркирующим горизонтам, уточнить их стратиграфическую приуроченность

и особенности простираения как по латерали вдоль маршрута, так и в разрезе.

Методика применения метода СПАН для формирования магнитной и плотностной модели глубинного разреза изложена авторами в ряде статей по результатам решения нефтегазопищевых задач на основе материалов высокоточных аэромагнитных и гидромагнитных съемок в ряде регионов России (Тимано-Печорской, Волго-Уральской, Прикаспийской нефтегазоносных провинциях, Восточной Сибири) и на акваториях Северного, Баренцева, Берингова и Средиземного морей (Копытенко, Петрова, 2011; Литвинова, Петрова, 2013; Мавричев и др., 2002, 2006; Петрова, Петрищев, 2011; Litvinova, Petrova, 2010; Petrova et al., 2011).

Метод СПАН высокоточных аэромагнитных данных опробован на месторождениях алмазов Уральского региона в бассейнах рек Волянка, Рассольной, Илья-Вож (Петрова, Мавричев, 2004). Применение метода позволило выделить субвертикальные слабомагнитные объекты и проследить пути флюидо-эксплозивных потоков, проходящих с глубины около 9 км к дневной поверхности. Это дало возможность найти характерные признаки магнитных аномалий флюидо-эксплозивных образований известных месторождений и наметить перспективы поисков новых объектов с телами инъективных форм (Лукьянова и др., 2011; Lyukianova, Petrova, 2014).

Для оценки флюидной системы на юге Восточной Сибири построены глубинные разрезы вдоль широтной системы основных профилей по магнитным аномалиям и аномалиям поля силы тяжести (рис. 1а). Дополнительные разрезы проведены через известные термальные источники. С целью уточнения пространственного распределения намагниченности и плотности пород на разных глубинных уровнях был выполнен двумерный расчет моделей намагниченности и плотности. Глубина уровня среза выбрана по глубинным разрезам, исходя из особенностей спектральной структуры аномальных полей, с учетом характера слоистости среды, простираения зон нарушений на разных глубинных уровнях, сейсмических данных и бурения. Особое внимание уделено выявлению глубин ослабленных разгрузочных зон в литолого-стратиграфических комплексах, выделяемых в виде градиентных областей с резко пониженными магнитными или плотностными свойствами.

Учитывая влияния на процесс рудообразования гидротермальных и термофлюидных потоков, на схемах распределения намагниченности и плотности пород юга Восточной Сибири показаны только слабомагнитные ареалы и ареалы пониженной плотности. Расчеты по аномалиям модуля геомагнитного поля (ГИС-Атлас, 2018;

Карта ..., 2000; Копытенко, Петрова, 2016, 2018) и гравиметрическим данным (Эринчек и др., 2008; Dahle et al., 2014; Mayer-Gürr et al., 2014) проведены в пределах площади 90°–120° в.д. и 51°–65° с.ш.

Результаты интерпретации на юге Восточной Сибири представлены в виде геомагнитных и плотностных глубинных разрезов и послойных двумерных моделей намагниченности и плотности. На основе их совместного анализа выявлены особенности внутреннего строения региона. Они проявились на разрезах в виде горизонтальных и вертикальных контактов пород разной намагниченности и плотности и характера распределения флюидных систем в земной коре.

По материалам проведенных исследований аномалий магнитного и гравитационного полей и сопоставления их с картами размещения перспективных площадей полезных ископаемых получен прогноз гидротермальных зон вблизи разведанных объектов сырья юго-восточной части Сибири (Карты ..., 2011; Мельникова, 2012; Назарьев и др. 2010; Петров и др., 2013).

В процессе работы выявлены характерные особенности расположения флюидной системы, развитой в верхах средней коры, и выделены участки возможных подъемов тепловых потоков к поверхности по каналам флюидной проработки. По результатам интерпретации выполненных расчетов получен прогноз размещения термальных зон.

Более детально по дополнительным профилям обследованы зоны, для которых известны перспективы освоения разведанных полезных ископаемых. Для разных типов ископаемых построены прогнозные схемы выходов флюидных каналов в районы рудных объектов черных, цветных и легирующих металлов, редкоземельных элементов, уранового, угольного, химического и агрохимического сырья, горнотехнических и строительных материалов, золоторудных объектов, алмазов и камнесамоцветов.

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Обобщение результатов анализа магнитометрических данных и аномалий силы тяжести по югу Восточной Сибири позволило предположить, что в рассматриваемом регионе граница смены вертикальной раздробленности на латеральную расслоенность расположена на глубине около 8–9 км и соответствует подошве верхней части земной коры. Треки температурной проработки выделяются на магнитных разрезах в верхней части коры. Подводящие каналы выходят к ее нижней границе из локальных флюидных систем, созданных в ослабленных слоях средней

части коры. Эти системы могут быть связаны между собой каналами реологически ослабленного вещества, изменение которого происходит в результате процесса динамотермального метаморфизма пород (Киссин, 2009). Этот процесс ведет к флюидонасыщению пород ослабленных слоев средней части коры и такие системы по этому признаку могут быть идентифицированы как флюидные (Петрова, Петрищев, 2011).

С целью проверки выдвинутых предположений выполнен расчет двумерных моделей пространственного распределения намагниченности и плотности. Двумерные модели построены по аномалиям модуля МПЗ (рис. 1б) и аномалиям силы тяжести (рис. 1в) (Карта ..., 2000; Копытенко, Петрова, 2018; Эринчек и др., 2008; Dahle et al., 2014; Mayer-Gürr et al., 2014). Для юга Восточной Сибири построена схема распределения слабомагнитных ареалов и зон пониженной плотности флюидных систем вблизи подошвы верхней коры. Модели распределения слабомагнитных областей (рис. 1б) и зон пониженной плотности (рис. 1в) дают представление о физических свойствах пород ослабленного слоя вдоль подошвы верхней коры на глубине около 9–10 км. Эти зоны предположительно ассоциируются с активными проявлениями линз флюидных систем, способствующих созданию резервуаров подпитки термальных зон в верхней части коры.

Совместный анализ глубинных магнитных разрезов с площадными расчетами намагниченности подчеркнул роль флюидной активности в гидротермальном процессе рудообразования. Наиболее наглядно это проявлено в характере намагниченности пород, так как она сильнее зависит от температуры, чем другие параметры среды, такие как пористость, трещиноватость и флюидонасыщенность.

Через флюидные системы, выявленные по двумерным моделям намагниченности и плотности на глубине около 9–10 км вблизи подошвы верхней коры, построены магнитные и плотностные разрезы. Магнитные разрезы Сухоложского золоторудного поля приведены на фоне двумерной модели намагниченности (рис. 1б), а плотностные разрезы — на фоне двумерной модели плотности (рис. 1в).

На широтном разрезе через северную оконечность Сухоложского золоторудного поля (59° с.ш., 115.3° в.д.) (рис. 2а, 2б) флюидная система выделяется по разломной зоне в виде субвертикальной цепочки слабомагнитных линз, прослеживающихся с глубины более 15 км. Южнее, на широтном разрезе 58.5° с.ш. Сухоложского золоторудного поля флюидная система и термофлюидные потоки проявляются в виде слабомагнитных разуплотненных линз и трек

флюидопроводящих каналов с глубины 10–12 км (58.5° с.ш., 115.4° в.д.) (рис. 2в, 2г).

В результате детального анализа Сухоложского золоторудного поля выявлены возможные пути выхода глубинных термофлюидных потоков, играющих значительную роль в локализации золоторудных объектов (Петрова, Копытенко, 2019).

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗВЕСТНЫХ ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Для исследования областей тектонически-активного региона в качестве эталонов выбраны наиболее известные места проявления гидротермальной активности — геотермальные поля юга Восточной Сибири. Для оценки зависимости температуры источника от глубины подпитки в данном регионе были рассчитаны магнитные и плотностные разрезы через известные выходы термальных вод.

Байкальская зона относится к активной тектонической зоне, ассоциируемой с процессами рифтогенеза (Артюшков, 1993; Бердичевский и др., 1999; Мельникова, 2012). Исследования земной коры и мантии методами сейсмического зондирования и по геоэлектрическим данным позволили выделить зоны повышенной проводимости с пониженными скоростями сейсмических волн на глубинах от 10–12 до 17–20 км (Киссин, 2009). По глубинным магнитным разрезам эти зоны выделяются в виде слабомагнитных субвертикальных зон (Копытенко и др., 2011).

По результатам совместной интерпретации плотностных и магнитных разрезов с данными магнитотеллурических зондирований было установлено, что проводящие слои в диапазоне глубин от 20 км до 45 км на плотностном разрезе соответствуют реологически ослабленным зонам повышенной пористости в условиях разогрева до температуры более, чем 600°C. На геомагнитном разрезе эта зона разогрева приурочена к областям слабомагнитных пород, находящихся при температурах выше точки Кюри (560°C) (Бердичевский и др., 1999; Киссин, 2009; Копытенко и др., 2011; Pechersky, Genshaft, 2001).

Горячий термальный источник с температурой выхода воды до 81°C расположен на западном берегу о. Байкал в северной его части (Мыс Котельниковский (рис. 1а)). Магнитный и плотностной разрезы через Мыс Котельниковский по профилю К-К (рис. 1а, 3а, 3б) приведены на фоне двумерной модели намагниченности на глубине ~9–10 км (рис. 1б).

Расчеты глубинных разрезов через Мыс Котельниковский показали, что под ним прослеживается субвертикальный трек флюидного

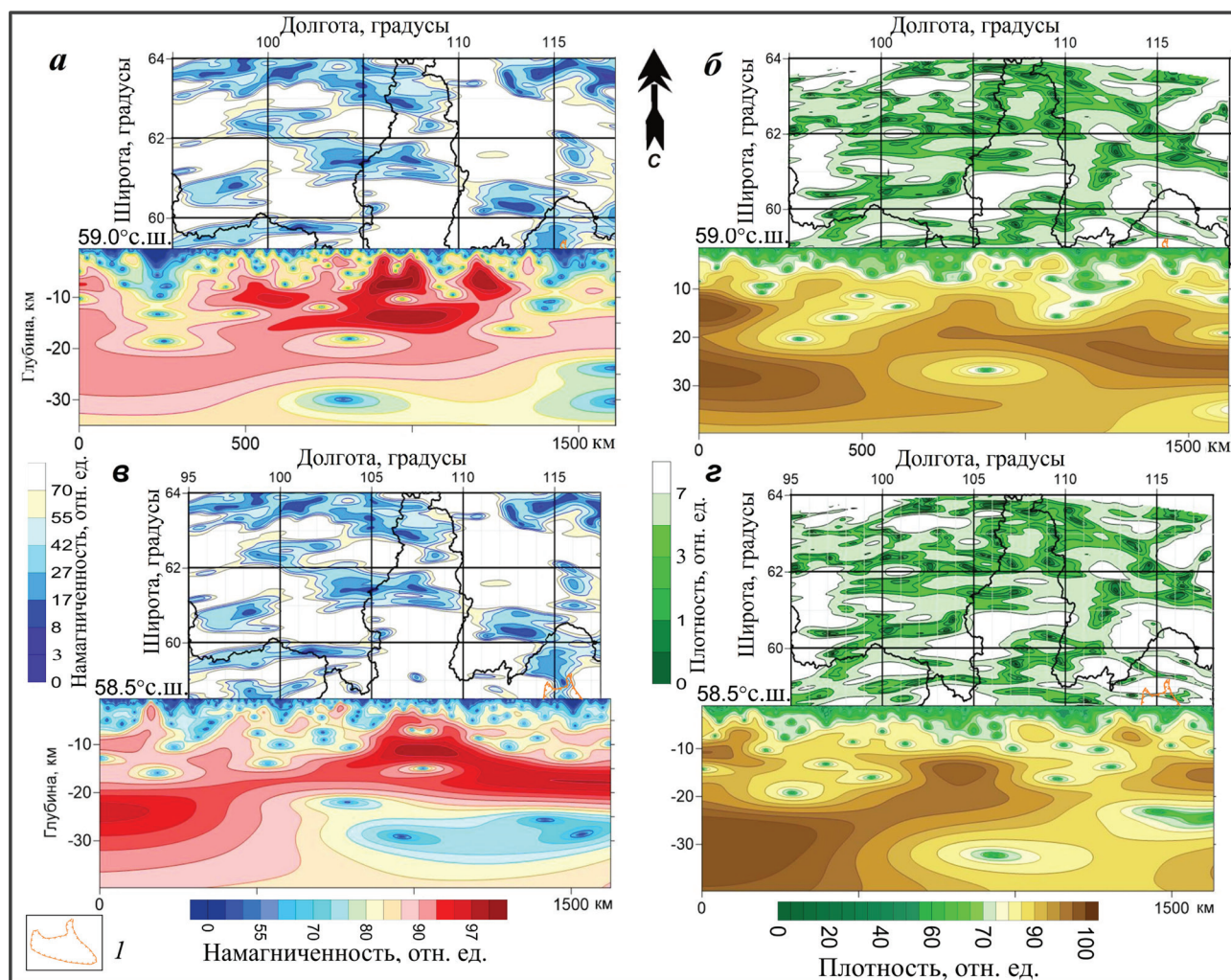


Рис. 2. Глубинные разрезы Сухоложского золоторудного поля через флюидные системы вблизи подошвы верхней коры: магнитный (*а*) и плотностной (*б*) — по широте 59.0°с.ш.; магнитный (*в*) и плотностной (*з*) разрезы по широте 58.5°с.ш.: *1* — Сухоложское золоторудное поле. Местоположение разрезов представлено на рис. 1а.

Fig. 2. Depth sections of the Sukholozhskoye gold ore field through fluid systems near the bottom of the upper crust: magnetic (*a*) and density (*b*) — at a latitude of 59.0°N; magnetic (*v*) and density (*z*) sections along the latitude of 58.5°N: *1* — Sukholozhskoye gold ore field. Location sections are shown in Fig. 1a.

потока, восходящего по проводящему разлому из разогретой линзы с глубины 14–16 км к поверхности. При этом горячая поверхность мантии в этой зоне под о. Байкал и к востоку от него поднимается почти до глубины 20 км (рис. 3а, 3б).

На восточном берегу о. Байкал развита мощная субмеридиональная флюидная система на глубине 9–10 км в низах верхней коры (рис. 1б). Именно в этой зоне на восточном побережье о. Байкал в районе р. Гарга известен горячий термальный источник с температурой воды около 76°С (рис. 1а). Глубинные разрезы через район р. Гарга (профиль Г-Г, рис. 1а) показали, что поверхность мантии находится здесь на глубине ~25 км. Помимо высокого расположения мантии, по гидротермальному треку возможна дополнительная подпитка из промежуточной линзы флюидной системы с глубины 10–18 км,

что, вероятно, и обеспечивает высокую температуру воды на поверхности в районе термального источника р. Гарга (рис. 3в, 3г).

Севернее о. Байкал известен термальный источник Джелинда с температурой выхода воды около 44°С (рис. 1а). Магнитный разрез (профиль Д-Д, рис. 1а) показал, что подпитка источника идет с глубины 7–10 км (рис. 4а). Поверхность мантии в этой зоне поднимается до 17 км, однако флюидоупор мощностью около 3 км в интервале глубин 12–15 км, по-видимому, задерживает основной подток из мантии, что приводит к снижению температуры источника.

В урочище Нилова Пустынь (рис. 1а) известна грязевая термальная зона с температурой до 43°С (Шкляр, 2009). Магнитный разрез (профиль Н-Н, рис. 1а) показал, что канал подпитки грязевой термальной зоны прослеживается с

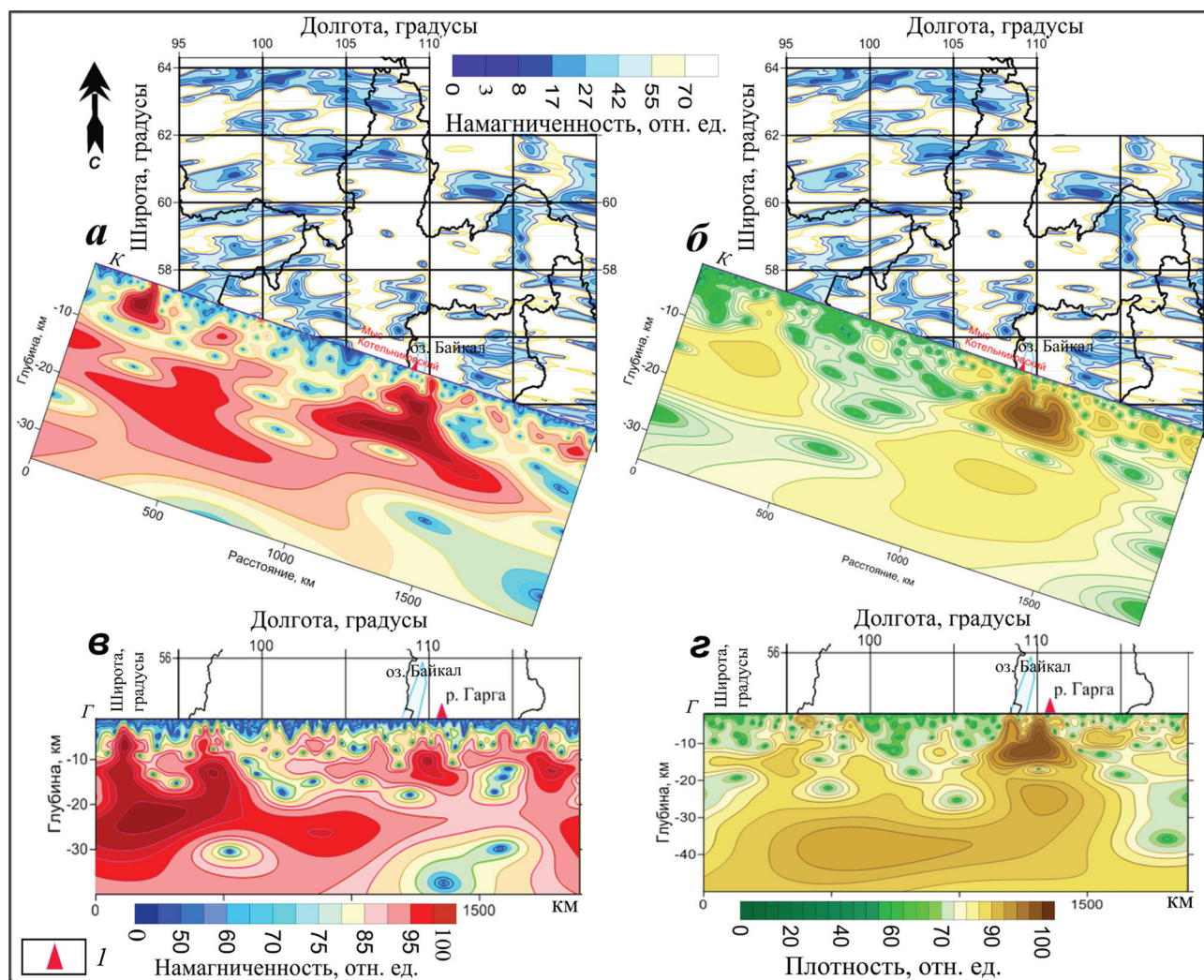


Рис. 3. Разрезы через горячие источники: Мыс Котельниковский (81°C) (профиль К-К рис. 1а) магнитный (а) и плотностной (б); термальный источник реки Гарга (76°C) (профиль Г-Г рис. 1а) магнитный (в) и плотностной (г): 1 — известные термальные источники. Местоположение разрезов представлено на рис. 1а.

Fig. 3. Sections through hot springs: Cape Kotelnikovskiy (81°C) (K-K profile. Fig. 1a) magnetic (a) and density (б); the thermal source of the Garga River (76°C) (profile Г-Г Fig. 1a) is magnetic (в) and density (г): 1 — known thermal sources. Location sections are shown in Fig. 1a.

глубины 5–6 км (рис. 4б). В этой зоне, близкой к южной части о. Байкал, мантия приподнята до 13 км. Однако, несмотря на высокое положение мантии, вероятно, из-за частичного перекрытия путей миграции на глубинах от 5 до 8 км мощным флюидоупором температура источника на поверхности все-таки не превышает 42–43°C.

Несколько грязевых месторождений с температурой около 40–42°C известны в районе Усть-Кутское (рис. 1а) (Шпейзер и др., 2012). По магнитному разрезу (профиль У-У, рис. 1а) следы флюидного подтока на месторождении Усть-Кутское прослеживаются по каналу с глубины почти 10 км (рис. 4в). Однако путь теплового потока перекрывается несколькими горизонтами флюидоупоров, в частности, на интервале глубин 8–10 км и 2–5 км (рис. 4г). Это, по-видимому, приводит к снижению ско-

рости потока и его охлаждению при выходе на поверхность.

На основе магнитных и плотностных разрезов через известные зоны геотермальной активности юга Восточной Сибири получена оценка зависимости температуры термального источника от глубины расположения подпитывающих флюидных систем и особенностей горизонтов флюидоупоров, перекрывающих термофлюидные потоки.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПО ПЛОЩАДИ НА РАЗНЫХ УРОВНЯХ ГЛУБИН

Двумерная модель распределения намагниченности и плотности на различных глубинах позволяет проанализировать местоположение

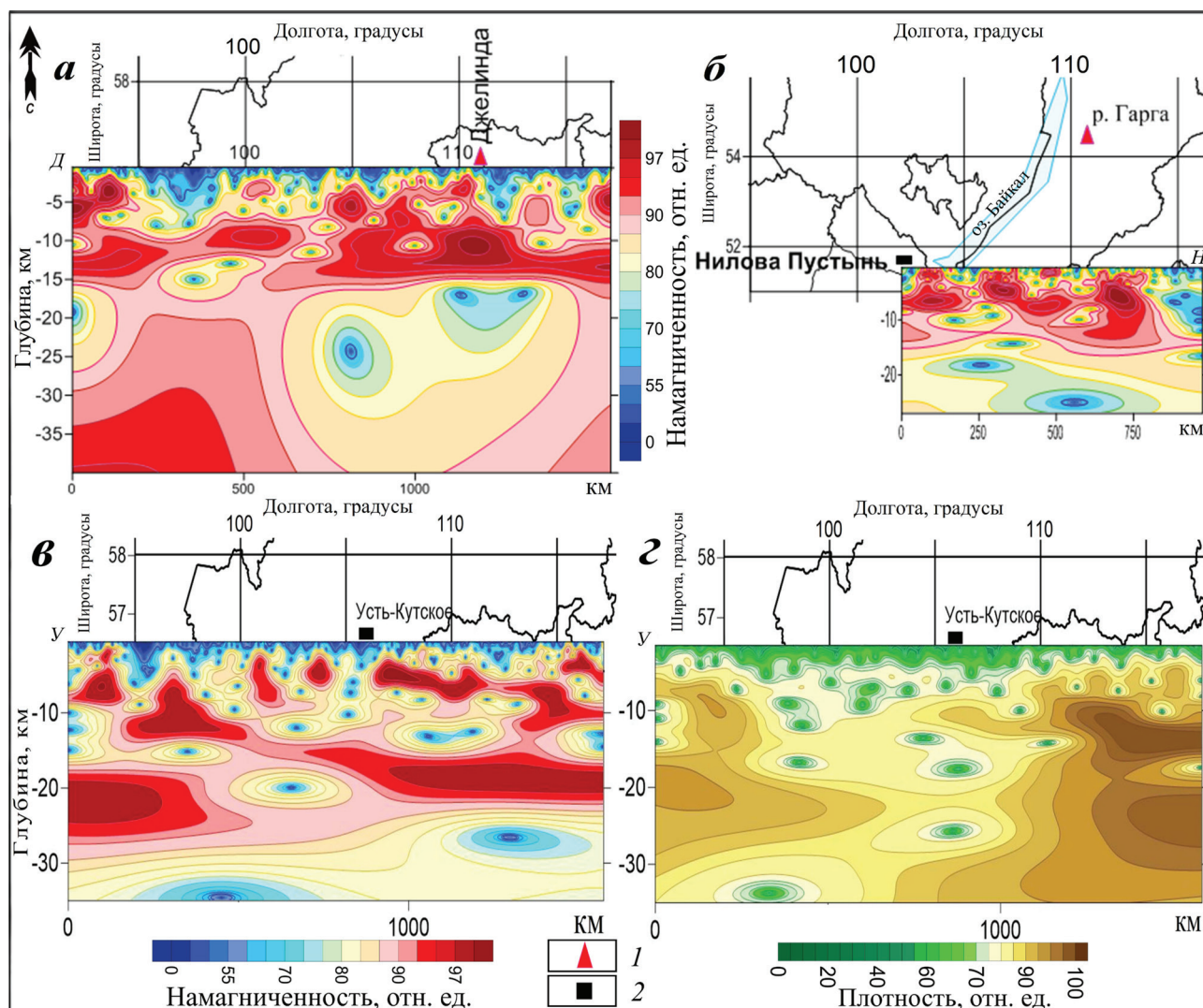


Рис. 4. Разрезы через термальные источники: магнитные — термальный источник Джелинда (44°C) (профиль Д-Д рис. 1а) (а); грязевая термальная зона урочища Нилова Пустынь (42°C) (профиль Н-Н рис. 1а) (б); магнитный (в) и плотностной (г) разрезы через термальную зону грязевых месторождений Усть-Кутское (40–42°C) (профиль У-У рис. 1а): 1 — известные термальные источники; 2 — известные грязевые месторождения. Местоположение разрезов представлено на рис. 1а.

Fig. 4. Sections through thermal sources: magnetic — Jelinda thermal source (44°C) (Д-Д -profile, Fig. 1а) (а); Mud thermal zone of the Nilov Pustyn tract (42°C) (Н-Н profile Fig. 1а) (б); magnetic (в) and density (г) sections through the thermal zone of the Ust-Kutskoye mud deposits (40–42°C) (profile У-У fig. 1а): 1 — known thermal springs; 2 — known mud deposits. Location sections are shown in Fig. 1а.

слоев ослабленных зон и соотношение их между собой. Анализ моделей намагниченности и плотности пород на разных уровнях земной коры проведен с учетом параметров рассмотренных термальных источников юга Восточной Сибири на территории 95°–119° в.д. и 51°–64° с.ш. (рис. 1а).

В процессе работы выявлены наиболее перспективные участки подпитки термальными водами и построено площадное распределение слабомагнитных и трещиноватых зон пониженной плотности на глубинах 12, 9–10, 8, 5 и 2.5 км.

Для глубин, доступных для бурения, наибольший интерес представляет прогноз распределения слабомагнитных ареалов на глубине

~2.5 км (рис. 5а). Анализ глубин флюидных линз земной коры и верхней мантии, питающих термофлюидные каналы, показал, что сквозные вертикальные каналы осуществляют подпитку резервуаров тепловыми потоками по подводящим разломным зонам с глубины более 8–12 км (рис. 3–5а). Полученное распределение слабомагнитных ареалов на глубине ~2.5 км с дифференциацией их по глубине подпитки источника канала отражает наиболее вероятное местоположение термальных зон юга Восточной Сибири, перспективных на использование геотермальной энергии в практических целях на глубинах до 3 км (рис. 5а). Более глубокий уровень подпитки

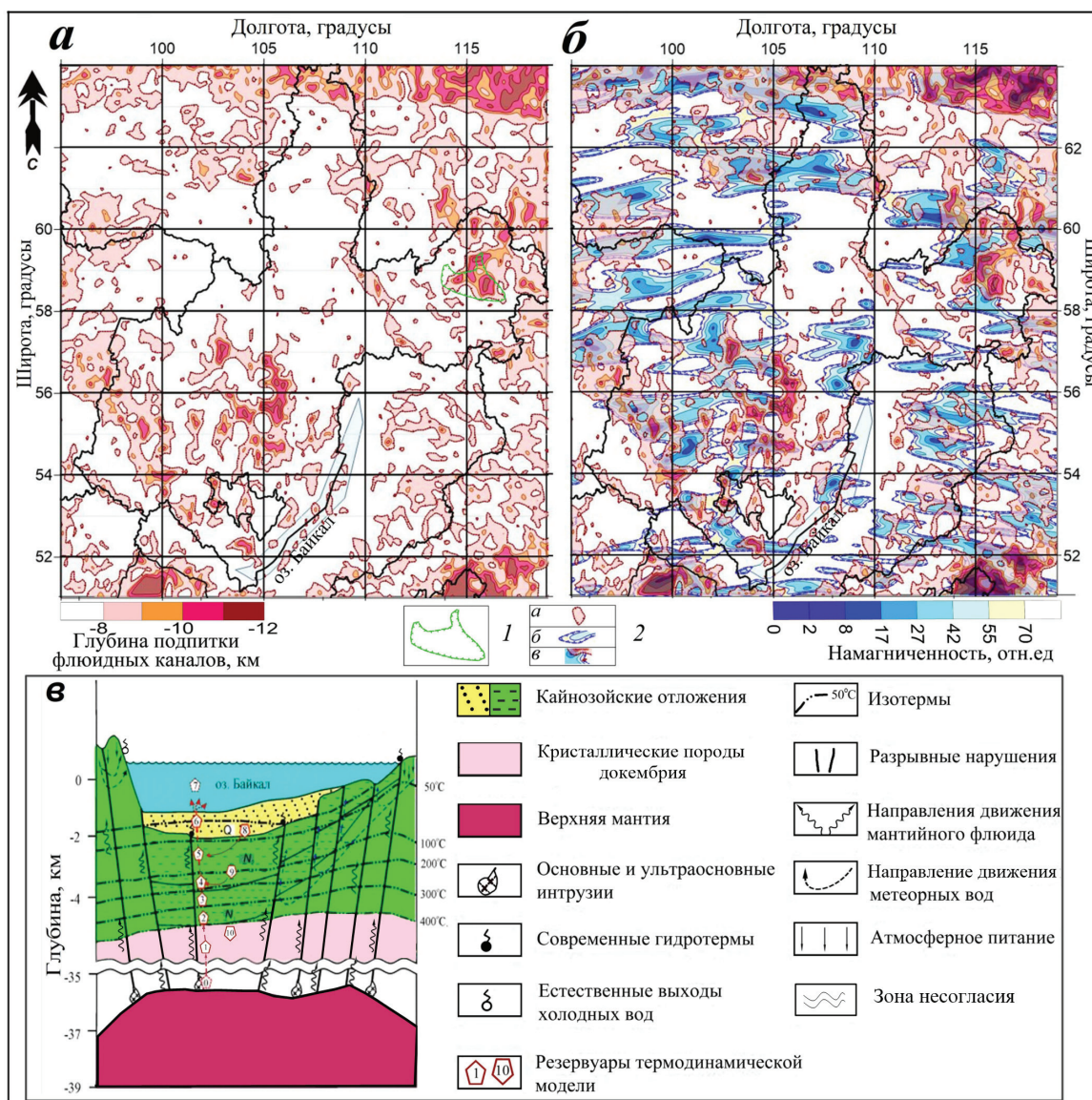


Рис. 5. Прогноз распределения слабомагнитных ареалов на глубине около 2.5 км с учетом глубины подпитки термофлюидного канала (а); участки вертикальной подпитки в областях перекрытия слабомагнитных ареалов на глубинах около 2.5 км и 9–10 км (подошва верхней коры) (б); температуры Байкальской зоны по модели электромагнитного зондирования (разрез оз. Байкал (профиль Г-Г рис. 1а)) (в); 1 — Сухоложское золоторудное поле; 2 — изолинии слабомагнитных ареалов на глубине 2.5 км (а); изолинии слабомагнитных ареалов подошвы верхней коры (б); зоны выхода теплового потока сквозных вертикальных каналов (пересечение ареалов а и б) (в).

Fig. 5. The forecast of the distribution of weakly magnetic areas at the depth of about 2.5 km, taking into account the feeding depth of the thermofluid channel (a); zones of vertical feeding in the areas of overlap of low-magnetic areas at the depths of about 2.5 km and 9–10 km (the bottom of the upper crust) (b); temperature of the Baikal zone on the model of electromagnetic sounding (section of Lake Baikal (profile Г-Г fig. 1a)) (c). 1 — Sukholozhskoye gold ore field; 2 — isolines of weakly magnetic areas at the depth of 2.5 km (a); isolines of weakly magnetic areas of the upper crust (b); zones of heat flow output through the vertical channels (the intersection of areas a and b) (c).

может поддерживать более высокую температуру резервуара.

Визуализация свойств и состояния пород на разрезах через известные термальные источники позволяет предположить что с глубины 8–9 км до глубины ~2 км осуществляется вертикальная подпитка подземных вод с температурами до 45–60°C вблизи выделенных термальных ареалов

(рис. 5в). Большие глубины подпитки — более 10–15 км — могут обеспечивать на глубинах 2–3 км горячие термальные воды с температурой до 80–90°C.

Выход флюидного канала на северо-востоке площади приурочен к району Сухоложского золоторудного поля (рис. 5а). Поскольку «процесс накопления полезных ископаемых

определяется динамикой флюидного потока» (Кучеренко, 2013), возможно, что здесь расположена также одна из перспективных геотермальных зон юга Восточной Сибири.

На глубинных разрезах через месторождение Сухой Лог (рис. 1а (профиль СЛ)) выделяется местоположение выхода каналов к глубинам около 2 км из флюидных систем с глубин 8–10 и 15–18 км (рис. 6а, 6б). Магнитный разрез приведен на фоне двумерной модели намагниченности на глубине 2.5 км (рис. 5а). Плотностной разрез показан на фоне двумерной модели плотности на глубине 9–10 км (рис. 1б). Магнитный и плотностной разрезы подчеркивают особен-

ности глубинного строения земной коры и соотношение разнотермальных флюидных систем коры и верхней мантии (Лишневицкий, Дистлер, 2004).

Профиль вдоль 55° с.ш. на юго-западе Иркутской области (рис. 1а, 6в, 6г) пересекает центральную часть (55° с.ш.; 99.35° в.д.) района выхода к поверхности глубинного флюидопроводящего канала. Магнитный разрез приведен на фоне двумерной модели намагниченности на глубине 9–10 км (рис. 1б). Плотностной разрез показан на фоне двумерной модели плотности на глубине 9–10 км (рис. 1б). Проведенный анализ позволяет предположить наличие здесь под-

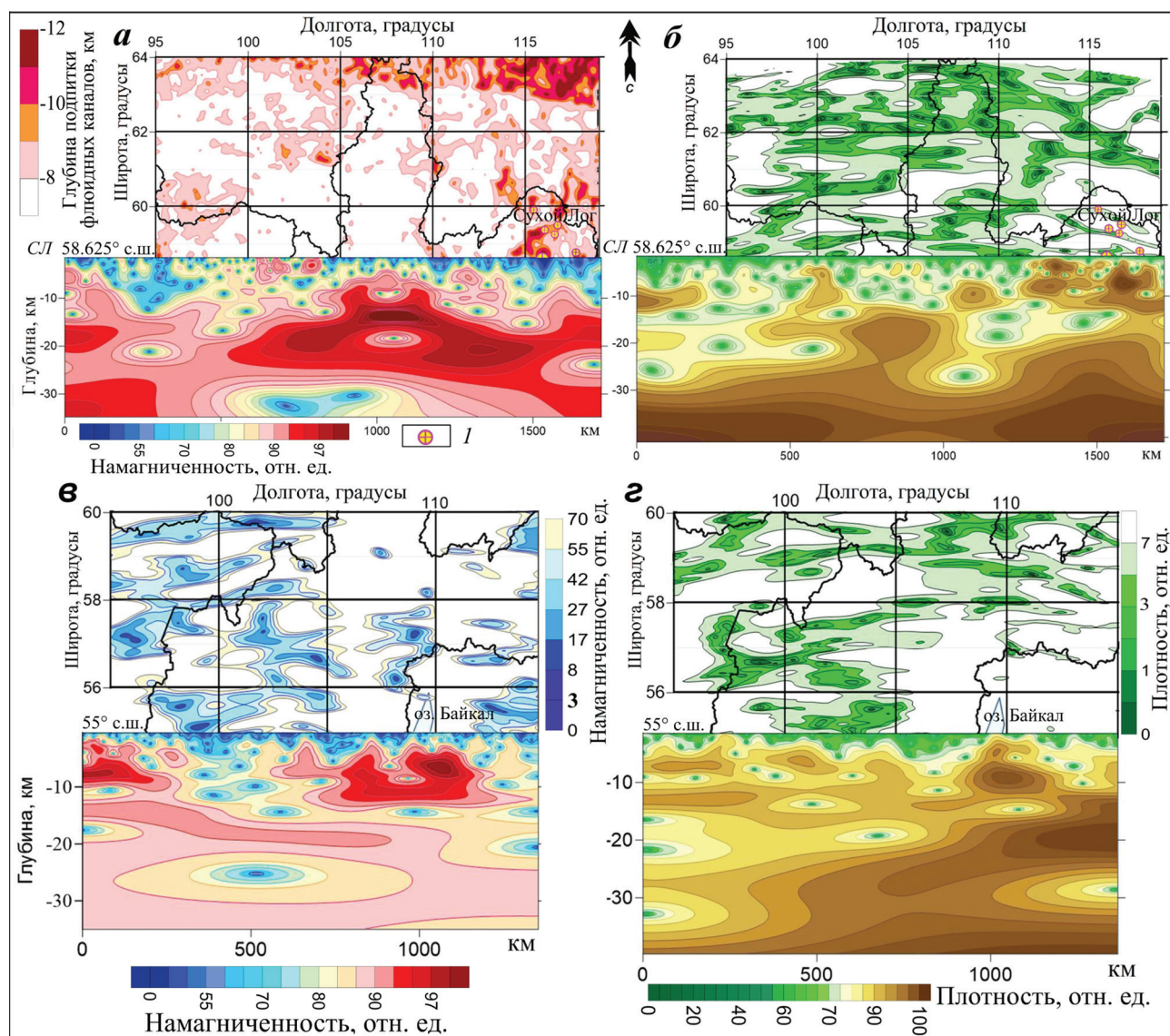


Рис. 6. Разрезы зон флюидных каналов: Сухоложского золоторудного поля (месторождение Сухой Лог (58.625°с.ш.; 115°в.д.), профиль СЛ, рис. 1а) — магнитный (а) и плотностной (б); термального ареала на юго-западе Иркутской области (55°с.ш.; 99.35°в.д.) — магнитный (в) и плотностной (г); 1 — золоторудные объекты. Местоположение разрезов представлено на рис. 1а.

Fig. 6. Sections of fluid channel zones: Sukhoi Log field (Sukhoi Log field (58.625°N; 115°E), СЛ profile, Fig. 1а) — magnetic (а) and density (б); thermal area in the south-west of the Irkutsk region (55°N; 99.35°E) — magnetic (в) and density (г); 1 — gold objects. Location sections are shown in Fig. 1а.

земных термальных вод на глубине около 2 км. Район известен проявлениями железа, марганца, кварца, алмаза, турмалина и халцедона.

Наибольший практический интерес для поиска термальных зон с повышенной температурой гидротермальных подземных вод на глубинах, доступных для бурения (начиная с 2 км), представляют сквозные вертикальные каналы, питающиеся мантийным теплом.

Для выявления наиболее горячих подземных вод выполнен направленный поиск вертикальных каналов на всей площади в диапазоне глубин от 2 до 10 км. На основе глубинных разрезов выделены вертикальные каналы, которые могут самым коротким путем с наименьшими потерями тепла подводить гидротермальные воды к поверхности. Наиболее высокие температуры подземных вод могут быть приурочены к областям пересечения флюидных каналов, идущих из низов верхней коры, выделенных на глубине около 9–10 км (рис. 1б), с ареалами, выделенными на глубине ~2.5 км (рис. 5а).

С целью поиска таких зон на ареалы глубинных восходящих каналов с глубины ≥ 9 –10 км (рис. 1б) были наложены ареалы предполагаемых резервуаров подземных термальных вод на глубине ~2.5 км (рис. 5а). В результате получены зоны совмещений в плане положений выходов к поверхности (глубины ≤ 2.5 км) вертикальных термофлюидных каналов (рис. 5б).

Даже при частичном пространственном пересечении этих областей существует вероятность выхода сквозных вертикальных восходящих каналов миграции теплового потока из флюидных систем средней части коры к поверхности с образованием термальной зоны.

ТЕРМАЛЬНЫЕ ЗОНЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ ИСКОПАЕМЫХ

На основе проведенной работы сделан прогноз размещения гидротермальных зон на площади юга Восточной Сибири. С учетом направлений геологоразведочных работ по основным видам минерального сырья построены прогнозные схемы гидротермальных зон в районах перспективных объектов полезных ископаемых. Они дают картину возможного распределения термальных зон на площади области для ископаемых разного типа (Карты ..., 2011; Назарьев и др., 2010).

Вблизи перспективных объектов полезных ископаемых, создающих ресурсы для развития потенциала региона, выявлены термальные зоны на глубине ~2 км. Площадь исследования пересечена системой основных широтных (рис. 1а) и дополнительных детализирующих профилей.

В результате анализа глубинных разрезов выделены термальные зоны вблизи выходов глубинных сквозных восходящих флюидных каналов (рис. 7а). На основе материалов двумерного поглубинного анализа выделены термальные ареалы в окрестности перспективных объектов полезных ископаемых (рис. 7б) (ГИС-Атлас, 2018; Карты ..., 2011). Схемы прогноза распределения термальных зон построены для минерально-сырьевой базы по следующим видам сырья (рис. 7б): рудных площадей черных металлов; рудных площадей цветных металлов; площадей редких руд и урана; угленосных объектов; объектов химического сырья; золоторудных объектов, алмазов.

Через центры термальных зон выполнены широтные глубинные разрезы (рис. 7). На глубинных разрезах выделены вертикальные и субвертикальные каналы, которые могут наиболее коротким путем с глубины ≥ 10 км подводить гидротермальные воды с наименьшими потерями тепла к поверхности (таблица, рис. 2, 7, 8).

При высоком положении мантии мантийное тепло может передаваться под большим давлением по наклонным траекториям разломов и трещин. Ветвистая система трещин тоже может служить проводником для флюидных потоков. Более сложные пути миграции были рассмотрены при совместном анализе площадных расчетов намагниченности и плотности на разных уровнях глубин и плотностных разрезов, позволяющих визуализировать смену простиражения разломов земной коры с глубиной. Прогнозные схемы гидротермальных зон в районах перспективных объектов полезных ископаемых дают более полную картину возможного распределения термальных зон разного типа на исследованной площади.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стратегия развития геологоразведочных работ предусматривает выявление перспективных направлений работ по геологическому изучению недр и недропользованию в области региональной геологии, твердых полезных ископаемых и подземных вод различного назначения с целью привлечения инвестиций на проведение приоритетных направлений.

С учетом основных направлений геологоразведочных работ по воспроизводству минерально-сырьевой базы по перспективным видам минерального сырья проведен поиск перспективных термальных зон вблизи месторождений полезных ископаемых юга Восточной Сибири. По оригинальной технологии интерпретации аномалий магнитного и гравитационного поля получено распределение флюидных систем

Термальные зоны вблизи перспективных объектов полезных ископаемых

Thermal zones near prospective minerals

№ п/п	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	№ центра	№ рисунка	Полезные ископаемые
1	63°	106.8°	1	7, 8a	Железо
2	59.8°	115.4°	2	7, 8b	Золото
3	59.8°	116.9°	3	7, 8b	Золото
4	59.25°	115.5°	4	7	Золото, титан,
5	58.5°	115.9°	5	2a, 2c, 7	Золото, кварцевый песок
6	57°	102.8°	6	7, 8b	Железо, кварцевый песок, алмазы
7	56.5°	99.2°	7	7, 8c	Железо, золото, алмазы, соль
8	56.5°	102.3°	8	7, 8c	Железо, золото, алмазы, соль
9	56°	97.8°	9	7	Железо, кварцит, алмазы, марганец,
10	55.5°	97.6°	10	7	Железо, кварцит, алмазы, марганец, никель, уран
11	55.04°	100.1°	11	7	Железо, кварцит, алмазы, марганец, соль
12	55°	100.2°	12	7	Железо, кварцит, марганец, уран
13	54.5°	101.3°	13	7, 8d	Титан
14	52.7°	101.9°	14	8e	железо, магнезит,
15	52.25°	104.2°	14	8e	алюминий, кварцит

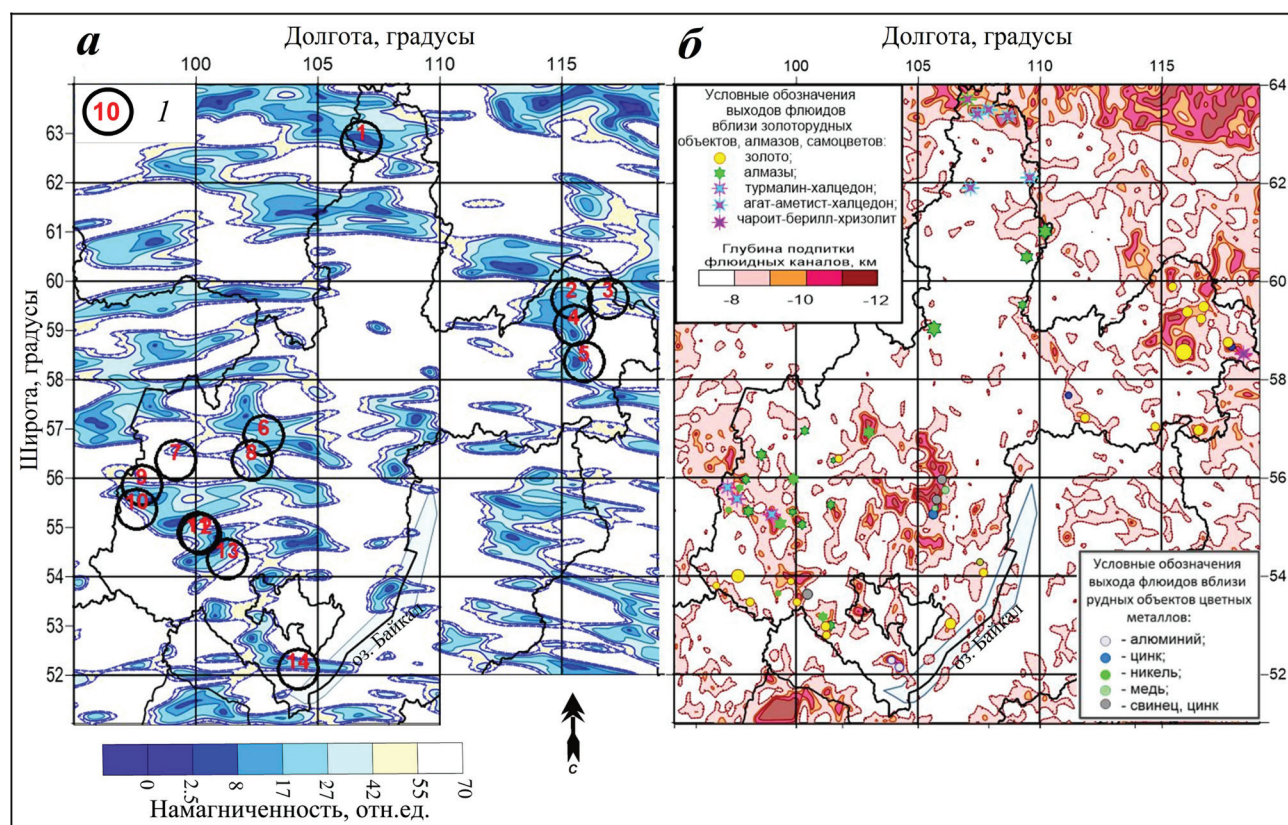


Рис. 7. Центры термальных зон юга Восточной Сибири на глубине 10 км (а) и локализация выходов флюидных каналов на глубине ~2.5 км вблизи объектов полезных ископаемых (б): 1 — номера центров термальных зон.

Fig. 7. The centers of the thermal zones in the south of Eastern Siberia at the depth of 10 km (a) and the localization of the fluid channels outlets at the depth of about 2.5 km near the objects of mineral resources (b): 1 — numbers of the centers of the thermal zones.

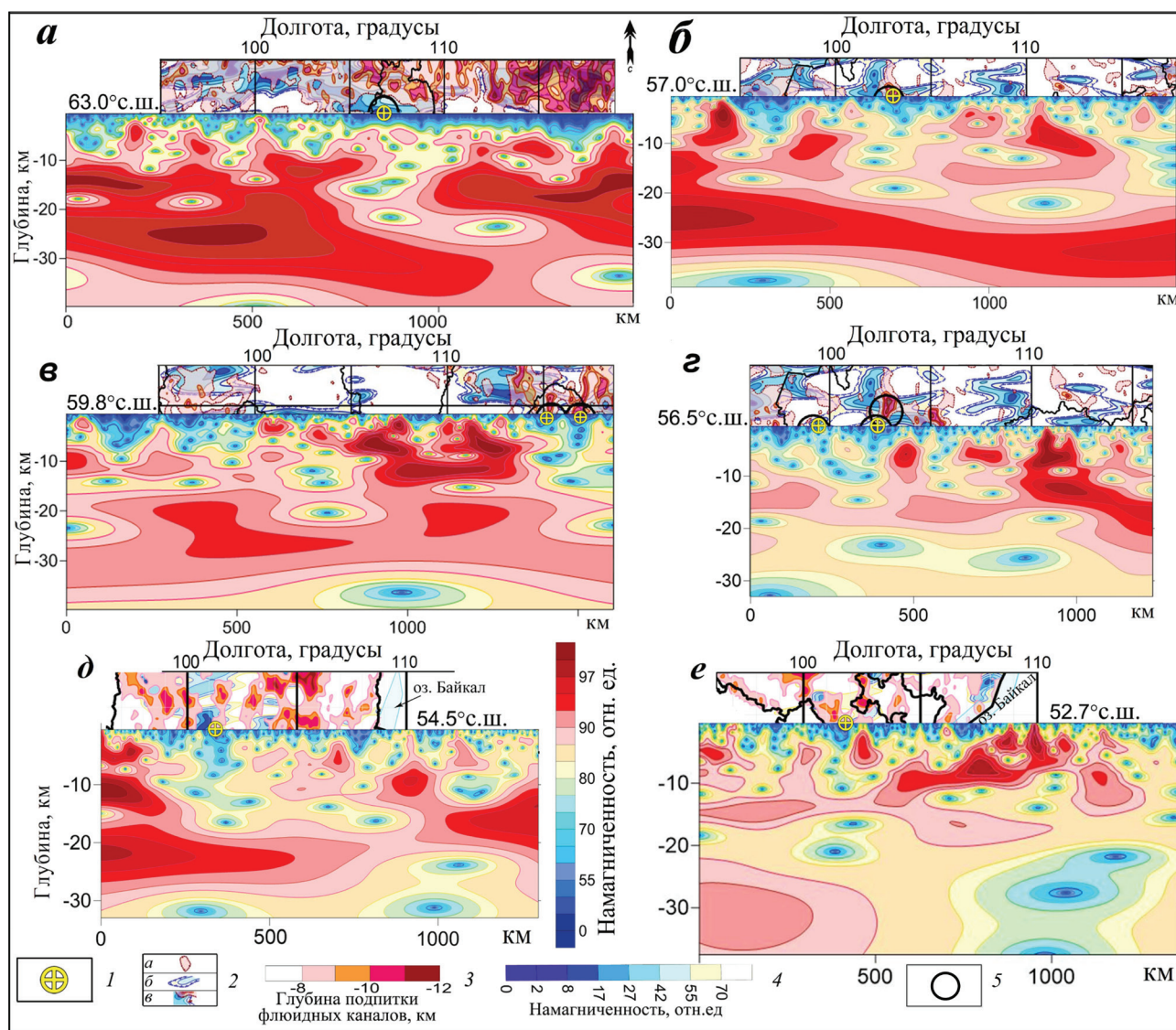


Рис. 8. Широтные магнитные разрезы через термальные зоны вблизи объектов полезных ископаемых на юге Восточной Сибири: 1 — положение центра выхода вертикального флюидного канала; 2 — изолинии слабомagnetных ареалов на глубине 2.5 км (а), изолинии слабомagnetных ареалов на глубине 9–10 км (б), зоны выхода теплового потока сквозных вертикальных каналов (пересечение ареалов а и б) (в); 3 — глубина подпитки флюидных каналов в термальных ареалах на глубине 2.5 км; 4 — намагниченность слабомagnetных ареалов вблизи подошвы верхней коры; 5 — термальные зоны вблизи объектов полезных ископаемых. Местоположение разрезов представлено на рис. 1а.

Fig. 8. Latitudinal magnetic sections through thermal zones near mineral objects in the south of East Siberia: 1 — position of the exit center of the vertical fluid channel; 2 — isolines of weakly magnetic areas at a depth of 2.5 km (a), isolines of weakly magnetic areas at a depth of 9–10 km (b), zones of heat flow through the vertical channels (the intersection of areas a and b) (v); 3 — depth of feeding of fluid channels in thermal areas at the depth of 2.5 km; 4 — magnetization of weakly magnetic areas near the base of the upper crust; 5 — thermal zones near mineral objects. Location sections are shown in Fig. 1a.

в верхней и средней части земной коры, определяющих гидротермальные процессы рудообразования полезных ископаемых.

По аномалиям магнитного поля и силы тяжести выполнено исследование глубинного строения известных зон геотермальной активности на юге Восточной Сибири. Проведен анализ термальных источников Байкальской зоны и грязевых месторождений. Магнитные и

плотностные разрезы через известные выходы термальных вод позволили сделать оценку зависимости температуры источника от глубины подпитки термофлюидного канала и свойств флюидоупорных горизонтов, перекрывающих тепловые потоки.

Площадное распределение намагниченности позволило выявить особенности флюидных систем земной коры для разных уровней глубин

для территории юга Восточной Сибири. На их основе построены схема распределения флюидных систем вблизи подошвы верхней коры (~9–10 км) и схема размещения слабомагнитных ареалов выходов тепловых термофлюидных потоков на глубинах, доступных для бурения (~2.5 км). Выявлено местоположение выходов вертикальных флюидных каналов термальных зон, представляющих наибольший практический интерес. Они могут с наименьшими потерями тепла подводить гидротермальные воды с глубины более 10 км до глубины 2–3 км.

По результатам проведенной работы впервые выделены термальные зоны вблизи перспективных объектов ископаемых, создающих ресурсы для развития минерально-сырьевого потенциала юга Восточной Сибири.

По основным видам минерального сырья построены схемы прогноза гидротермальных зон в районах перспективных объектов. Они дают картину распределения термальных зон вблизи ископаемых разного типа.

В результате проведенного исследования получены новые представления о глубинном строении юга Восточной Сибири и намечены площади для проведения наземных работ по изучению электромагнитных свойств пород в районах перспективных объектов полезных ископаемых.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания 0037 2014 0005.

Список литературы [References]

- Артюшков Е.В.* Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 456 с. [*Artyushkov E.V.* Fizicheskaya tektonika. M.: Science, 1993. 456 p. (in Russian)].
- Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Кошурников А.В.* Магнитотеллурические зондирования в Байкальской рифтовой зоне // Физика Земли. 1999. № 10. С. 3–26 [*Berdichevsky M.N., Vanyan L.L., Koshurnikov A.V.* Magnetotelluric sounding in the Baikal rift zone // *Izvestiya - Physics of the Solid Earth*. 1999. V. 35. № 10. P. 793–814].
- Гальбес М., Гомес И., Петрова А.А.* Методика совместного анализа структуры гравитационных и магнитных полей на примере территории СССР и Кубы // Геофизический сборник АН УССР: Аномалии геомагнитного поля и глубинное строение земной коры. Киев: Наукова думка, 1982. С. 81–87 [*Galbes M., Gomez I., Petrova A.A.* Methods of joint analysis of the structure of gravitational and magnetic fields on the example of the territory of the USSR and Cuba // *Geofizicheskiy sbornik AN USSR: Anomalii geomagnitnogo polya i glubinnoe stroenie zemnoy kory*. Kiev: Naukova dumka. 1982. P. 81–87 (in Russian)].
- ГИС-Атлас «Недра России», 2018 [GIS-Atlas «Nedra Rossii», 2018. <http://atlaspacket.vsegei.ru/> (in Russian)].
- Карта аномального магнитного поля России и сопредельных государств с объяснительной запиской на карте. Масштаб 1:5000000 / Отв. ред. Т.П. Литвинова. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000 [Map of the anomalous magnetic field of Russia and adjacent states with an explanatory note on the map. Scale 1:5000000 / Ed. T.P. Litvinova. SPb: Izd-vo VSEGEI, 2000 (in Russian)].
- Карты минерально-сырьевой базы Иркутской области // Изд-во ВСЕГЕИ, 2011. Электронный ресурс 22.05.2018 [Maps of the mineral resource base of the Irkutsk Region // Izd-vo VSEGEI, 2011. Elektronnyiy resurs 05/22/2018 (in Russian)].
- Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре: геофизический и тектонический аспекты. М.: Наука, 2009. 328 с. [*Kissin I.G.* Fluids in the Earth's crust: geophysical and tectonic aspects. M.: Nauka, 2009. 328 p. (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А.* Пути повышения ресурсного потенциала Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках проекта «Урал промышленный — УРАЛ Полярный» по геомагнитным данным // Материалы межрегионального проекта «Дни науки и инноваций Санкт-Петербурга в Ямало-Ненецком округе». ЯНАО: Изд-во ООО «Артвид». 2011. С. 40–63 [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A.* Ways to increase the resource potential of the Yamalo-Nenets Autonomous District in the framework of the project «Ural Industrial — Ural Polar» according to geomagnetic data Materialyi mejregionalnogo proekta «Dni nauki i innovatsiy Sankt-Peterburga v YAmalo-Nenetskom okrugе». YANAO: Izd-vo ООО «Artvid». 2011. P. 40–63 (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А.* Результаты разработки и применения компонентной модели магнитного поля Земли в интересах магнитной картографии и геофизики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 2. С. 88–106 [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A.* Results of the development and application of the component model of the Earth's magnetic field in the interests of magnetic cartography and geophysics. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016. V. 9. №. 2. P. 88–106 (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А.* Компоненты морских линейных магнитных аномалий Мирового океана. Ч. I. Северная Атлантика // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11. № 4. С. 34–41. <https://doi.org/10.7868/S2073667318040056> [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A.* Components of marine linear magnetic anomalies of the oceans. Part I. North Atlantic // *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2018. V. 11. № 4. P. 34–41 (in Russian)].
- Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Петрищев М.С.* Глубинное строение ослабленных зон Прибайкалья // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей / Материалы 38-й сессии международного семинара им. Д.Г. Успенского. Пермь: ГИ УрО РАН. 2011. С. 140–142 [*Kopytenko Yu.A., Petrova A.A., Petrichyev M.S.* Глубинное строение ослабленных зон Прибайкалья // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей / Материалы 38-й сессии международного семинара им. Д.Г. Успенского. Пермь: ГИ УрО РАН. 2011. С. 140–142 (in Russian)].

- Petrishchev M.S.* The deep structure of the weakened zones of the Baikal region *Voprosy i praktiki geologicheskoy interpretatsii geofizicheskikh poley / Materialy 38-y sessii mejdunarodnogo seminara im. D.G. Uspenskogo*. Perm: GI UrO RAN. 2011. P. 140–142 (in Russian)].
- Кучеренко И.В.* Проблемы образования гидротермальных месторождений золота. Ч. 2. Метаморфогенная и полигенная геолого-генетические концепции // *Известия Томского политехнического университета*. 2013. Т. 323. № 1. С. 105–113 [*Kucherenko I.V.* Problems of formation of hydrothermal gold deposits. Part 2. Metamorphogenic and polygenic geological and genetic concepts // *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta*. 2013. V. 323. № 1. P. 105–113 (in Russian)].
- Литвинова Т.П., Петрова А.А.* Проявление зон нефтегазогенерации Берингова моря в приземных магнитных аномалиях и аномалиях спутника Чамп // *Региональная геология и металлогения*. 2013. № 54. С. 17–24 [*Litvinova T.P., Petrova A.A.* The manifestation of zones of oil and gas generation of the Bering Sea in the surface magnetic anomalies and anomalies of the Champ satellite // *Regionalnaya geologiya i metallogeniya*. 2013. № 54. P. 17–24 (in Russian)].
- Лишнеvский Э.Н., Дистлер В.В.* Глубинное строение земной коры района золото-платинового месторождения Сухой Лог по геолого-геофизическим данным (Восточная Сибирь, Россия) // *Геология рудных месторождений*. 2004. Т. 46. № 1. С. 88–104 [*Lishnevsky E.N., Distler V.V.* Deep structure of the Earth's crust in the district of the Sukhoi Log gold-platinum deposit (Eastern Siberia, Russia) based on geological and geophysical data // *Geology of Ore Deposits*. 2004. V. 46. № 1. P. 76–96].
- Лукьянова Л.И., Остроумов В.Р., Петрова А.А. и др.* Алмазоносные флюидно-эксплозивные образования Пермского Предуралья. СПб.: Изд-во ГЕОКАРТ: ГЕОС: ВСЕГЕИ, 2011. 240 с. [*Lukyanova L.I., Ostroumov V.R., Petrova A.A. et al.* Diamond-bearing fluid-explosive formations of the Perm Cis-Urals. SPb: Izd-vo GEOKART: GEOS: VSEGEI, 2011. 240 p. (in Russian)].
- Мавричев В.Г., Петрова А.А.* Крупномасштабная аэромагнитная съемка осадочных бассейнов // *Разведка и охрана недр*. 2001. № 9. С. 14–18 [*Mavrichev V.G., Petrova A.A.* Large-scale aeromagnetic survey of sedimentary basins // *Razvedka i ohrana neдр*. 2001. № 9. P. 14–18 (in Russian)].
- Мавричев В.Г., Гололобов Ю.Н., Петрова А.А. и др.* Структура, состав и состояние нефтегазоносных комплексов разнотипных НГБ Сибири и Дальнего Востока // *Геологические проблемы развития углеводородной сырьевой базы Дальнего Востока и Сибири*. СПб. 2006. С. 154–159 [*Mavrichev V.G., Gololobov Yu.N., Petrova A.A. et al.* Structure, Composition, and State of Oil and Gas Complexes of Various Types of the NGB of Siberia and the Far East // *Geologicheskie problemy razvitiya uglevodorodnoy syirevoy bazy Dalnego Vostoka i Sibiri*. SPb. 2006. P. 154–159 (in Russian)].
- Мавричев В.Г., Козеев С.И., Петрова А.А. и др.* Роль аэрогеофизической съемки в решении нефтегазопоисковых задач // *Разведка и охрана недр*. 2002. № 12. С. 4–9 [*Mavrichev V.G., Kozeev S.I., Petrova A.A. et al.* The Role of Aerogeophysical Survey in Solving Oil and Gas Prospecting Problems // *Razvedka i ohrana neдр*. 2002. № 12. P. 4–9 (in Russian)].
- Мельникова Т.М.* Байкальский рифт как долгоживущая система // *Известия Ирк. ГУ. Серия «Геоархеология. Этнология. Антропология»*. № 1 (1). 2012. С. 3–21 [*Melnikova T.M.* Baikal Rift as a long-lived system // *Izvestiya Irk. GU. Seriya «Geoarheologiya. Etnologiya. Antropologiya»*. Iss. 1 (1). 2012. P. 3–21 (in Russian)].
- Назарьев В.А., Царев А.В., Суслов Н.А., Васильев В.И.* Минерально-сырьевой потенциал Иркутской области // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. № 1. 2010. С. 69–75 [*Nazaryev V.A., Tsarev A.V., Suslov N.A., Vasilyev V.I.* Mineral Resource Potential of the Irkutsk Region. *Geologiya i mineralno-syrevye resursy Sibiri* № 1. 2010. P. 69–75 (in Russian)].
- Наливкина Э.Б., Петрова А.А.* Магнетитовая зона земной коры континентов. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2018. 46 с. [*Nalivkina EB, Petrova A.A.* The magnetite zone of the continental crust. SPb: Izd-vo VSEGEI, 2018. 46 p. (in Russian)].
- Петрищев М.С., Петрова А.А.* Строение зон геотермальной активности Тирренского моря // *Двенадцатая уральская молодежная школа по геофизике: Сб. науч. материалов*. Пермь: ГИ УрО РАН. 2011. С. 176–181 [*Petrishchev M.S., Petrova A.A.* The structure of geothermal activity zones of the Tyrrhenian Sea // *Dvenadtsataya uralskaya molodejnaya shkola po geofizike: Sb. nauch. materialov*. Perm: GI UrO RAN. 2011. P. 176–181 (in Russian)].
- Петрищев М.С., Петрова А.А., Копытенко Ю.А.* Глубинное строение термальных зон по результатам комплексирования геофизических полей // *Материалы 38-й сессии международного научного семинара «Вопросы и практики геологической интерпретации геофизических полей»*, Пермь: ГИ УрО РАН 2011. С. 219–222 [*Petrishchev M.S., Petrova A.A., Kopytenko Yu.A.* Depth structure of thermal zones based on the results of integration of geophysical fields // *Materialy 38-y sessii mejdunarodnogo nauchnogo seminara «Voprosy i praktiki geologicheskoy interpretatsii geofizicheskikh poley»*, Perm: GI UrO RAN 2011. P. 219–222 (in Russian)].
- Петров О.В., Зубова Т.Н., Вербицкий В.Р.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 // *Труды VIII Всероссийского съезда геологов*. 2013. С. 19–33 [*Petrov O.V., Zubova T.N., Verbitsky V.R.* State geological map

- of the Russian Federation in scale 1:1 000 000 // Trudy VIII Vserossiyskogo syezda geologov. 2013. P. 19–33 (in Russian)].
- Петрова А.А.* Методика спектрально-корреляционного анализа аномального геомагнитного поля // Автореф. дисс. канд. ф.-м. наук. М., 1976. 25 с. [Petrova A.A. Methods of spectral correlation analysis of the anomalous geomagnetic field // Avtoref. diss. kand. f.-m. nauk. M., 1976. 25 p. (in Russian)].
- Петрова А.А.* Методика спектрально-пространственного анализа геомагнитного поля // Геофизический сборник АН УССР. 1977. Вып. 76. С. 55–66 [Petrova A.A. Methods of spectral-spatial analysis of the geomagnetic field // Geofizicheskii sbornik AN USSR. 1977. Iss. 76. P. 55–66 (in Russian)].
- Петрова А.А.* О влиянии рельефа фундамента на спектральную структуру аномального магнитного поля континентальных и океанических регионов // Геомагнитное поле и внутреннее строение Земли. М.: ИЗМИРАН, 1980. С. 137–144 [Petrova A.A. On the influence of the relief of the basement on the spectral structure of the anomalous magnetic field of the continental and oceanic regions // Geomagnitnoe pole i vnutrennee stroenie Zemli. M.: IZMIRAN, 1980. P. 137–144 (in Russian)].
- Петрова А.А.* Цифровые карты компонент вектора индукции магнитного поля // Сб. трудов ИЗМИРАН. М.: 2015. С. 412–423 [Petrova A.A. Digital maps of the components of the magnetic field induction vector // Sb. trudov IZMIRAN. M.: 2015. P. 412–423 (in Russian)].
- Петрова А.А., Карасик А.М.* Статистическая зависимость параметров спектральной структуры магнитного поля от рельефа магнитного фундамента Северного Ледовитого океана // Океанология. Т. XIX. 1979. № 3. С. 526–528 [Petrova A.A., Karasik A.M. Statistical dependence of the parameters of the spectral structure of the magnetic field on the relief of the magnetic basement of the Arctic Ocean // Okeanologiya. V. XIX. 1979. Iss. 3. P. 526–528 (in Russian)].
- Петрова А.А., Колесова В.И.* А. с. № 1289232. Способ геофизической разведки. 1986 [Petrova A.A., Kolesova V.I. A. s. № 1289232. Method of geophysical prospecting. 1986 (in Russian)].
- Петрова А.А., Колесова В.И., Почтарев В.И.* Изменение спектральной структуры магнитного поля и его производных с высотой // Аномалии геомагнитного поля и глубинное строение земной коры. Киев: Наукова думка, 1981. С. 44–56 [Petrova A.A., Kolesova V.I., Pochtarev V.I. Change of the spectral structure of the magnetic field and its derivatives with height // Anomalii geomagnitnogo polya i glubinnoe stroenie zemnoy koryi. Kiev: Naukova dumka, 1981. P. 44–56 (in Russian)].
- Петрова А.А., Копытенко Ю.А.* Флюидные системы Мамско-Бодайбинской минералогической зоны северного Забайкалья // Вестник КРАУНЦ.
- Науки о Земле. 2019. № 1. Вып. 41. С. 37–53. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-37-53> [Petrova A.A., Kopytenko Yu.A. Fluid systems of the Mamsko-Bodaibin mineragenic zone in north Transbaikalia // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2019. № 1(41). P. 37–53. (in Russian)].
- Петрова А.А., Мавричев В.Г.* Геомагнитный метод прогноза коренных месторождений алмазов на примере Красновишерского района // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее. СПб.: ВСЕГЕИ. 2004. С. 261–265 [Petrova A.A., Mavrichev V.G. Geomagnetic method of prediction of primary diamond deposits on the example of Krasnovishersky district // Effektivnost prognozirovaniya i poiskov mestorozhdeniy almazov: proshloe, nastoyashee i budushee. SPb.: VSEGEI. 2004. P. 261–265 (in Russian)].
- Петрова А.А., Петрищев М.С.* Флюидные системы Средиземноморья // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. № 17. С. 23–33 [Petrova A.A., Petrishchev M.S. Fluid Systems of the Mediterranean // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2011. № 1(17). P. 23–33 (in Russian)].
- Петрова А.А., Петрищев М.С., Копытенко Ю.А.* Проявление треков термальных зон в строении земной коры Аравийского полуострова // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей // Материалы 40-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. М.: ИФЗ РАН, 2013. С. 268–273 [Petrova A.A., Petrishchev M.S., Kopytenko Yu.A. Manifestation of tracks of thermal zones in the structure of the crust of the Arabian Peninsula // Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretatsii gravitatsionnykh, magnitnykh i elektricheskikh poley // Materialy 40-y sessii Mejdunarodnogo seminar im. D.G. Uspenskogo. M.: IFZ RAN, 2013. P. 268–273 (in Russian)].
- Розен О.М.* Сибирский кратон: тектоническое районирование, вопросы эволюции // Геотектоника. 2003. № 3. С. 3–21 [Rosen O.M. The Siberian Craton: tectonic zonation and stages of evolution. Geotectonics. 2003.V. 37. № 3. P. 175–192].
- Шкляр А.П.* Гигиеническая характеристика и оценка оздоровительного эффекта природных факторов курортной зоны «Нилова Пустынь» республики Бурятия // Автореф. дисс. канд. мед. наук. Иркутск, 2009. 23 с. [Shklyar A.P. Hygienic characteristics and assessment of the health effect of the natural factors of the resort area «Nilova Pustyn» of the Republic of Buryatia // Avtoref. diss. kand. med. nauk. Irkutsk, 2009. 23 p. (in Russian)].
- Шнейзер Г.М., Минеева Л.А., Родионова В.А.* Гидроминеральные комплексы Иркутской области // Международный научно-исследовательский журнал. № 7–1(7). 2012. С. 35–40 [Shpejzer G.M., Mineeva L.A., Rodionova V.A. Hydromineral complexes

- of the Irkutsk region // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. № 7–1(7). 2012. P. 35–40 (in Russian)].
- Эринчек Ю.М., Кирсанов А.А., Литвинова Т.П. и др.* Создание Атласа сводных карт территории России («Космический образ России», «Атлас геофизических карт России», «Атлас геохимических карт России») // Изд-во ВСЕГЕИ. 2006. Т. 6 (54). СПб. 2008. С. 48–60 [*Erinchek Yu.M., Kirsanov A.A., Litvinova T.P. et al.* Creation of the Atlas of summary maps of the territory of Russia («Kosmicheskii obraz Rossii», «Atlas geofizicheskikh kart Rossii», «Atlas geohimicheskikh kart Rossii») // Izd-vo VSEGEI. 2006. V. 6 (54). SPb. 2008. P. 48–60 (in Russian)].
- Dahle C., Flechner F., Gruber C. et al.* Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ; GFZ GRACE Level-2 Processing Standards Document for Level-2 Product Release 0005: revised edition; Potsdam. 2013. <https://doi.org/10.2312/GFZ.b103-1202-25>.
- Litvinova T., Petrova A.* The specific features of gold ore provinces of the south of Siberia in a magnetic field at ground height and heights of flight of satellite Champ // EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria, 2010. V. 12. EGU2010-6552.
- Litvinova T., Petrova A., Petrishchev M.* Electromagnetic imaging of lithosphere permeable zones // EGU General Assembly, Austria, Vienna, 2014 V. 16. EGU2014-8938.
- Lyukianova L., Petrova A.* Geomagnetic method of primary diamond deposits prediction exemplified by the Western Urals // EGU General Assembly 2014. Vienna, Austria. EGU2014-4086.
- Mayer-Gürr T., Zehentner N., Klinger B. et al.* ITSG-Grace2014: a new GRACE gravity field release computed in Graz/ Potsdam, 2014.
- Pechersky D.M., Genshaft Yu.S.* Petromagnetism of the continental lithosphere and the origin of regional magnetic anomalies: A review // *Russian journal of earth sciences*. V. 3. № 2. 2001. p. 97–124. <https://doi.org/10.2205/2001ES000059>.
- Petrishchev M., Petrova A., Kopytenko Yu. et al.* Electromagnetic imaging of crustal geothermal systems within the Northern Andes // Volume of XII th Scientific Assembly of IAGA, Merida, Mexico. 2013. P. 101.
- Petrova A.A., Kolesova V.I., Domaratskij S.N.* The Space-Spectral Analysis Method in Applied Geophysics // *Russian Airborne Geophysics and Remote sensing*. Golden. Colorado. 1992. P. 525–534.
- Petrova A.A., Kopytenko Yu.A., Petrishchev M. S.* Deep Fluid Systems of Fennoscandia Greenstone Belts // *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields*, 2019. C. 239–247. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_28.
- Petrova A., Demina I., Petrishchev M.* Detection of the deep approach fluid channels in the oil-and-gas basins using the geomagnetic data (North and Norwegian Seas) // *Proc. 10th ICAM, Trondheim: Norway*, 2011. P. 523–529.

GEOTHERMAL ZONES OF THE SOUTH OF EAST SIBERIA

A.A. Petrova, Yu.A. Kopytenko

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
of the Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg Branch,
199034, St. Petersburg, Russia*

The article presents the results of the study of geothermal activity zones in the south of Eastern Siberia. In order to study the deep structure of the Earth's crust in Transbaikalia, an analysis of the anomalies of the magnetic field and gravity has been carried out. The study of deep sections through the zones of known thermal springs and mud deposits resulted in an assessment of the dependence of the thermal source temperature on the depth of the feed fluid systems. An analysis of the magnetic and density sections of the south of Eastern Siberia revealed deep fluid systems and peculiarities of the hydrothermal potential in the region. Using the models of the magnetization and density distribution, the authors have constructed location schemes for the fluid systems at different depths in the earth's crust and revealed the ways of the thermofluid flows ascending to the surface. The results of the study showed that ascending migration of fluids with the least heat loss brings hydrothermal waters to the surface through vertical faults that cut the crystalline basement in the depth interval from 2 to 10 km. Based on the analysis of heterogeneity in the deep structure of the basement, a forecast of hydrothermal zones for the south of Eastern Siberia near promising mineral resources has been made.

Keywords: thermal source, fluid system, magnetic anomalies.