

ФЛЮИДНЫЕ СИСТЕМЫ МАМСКО-БОДАЙБИНСКОЙ МИНЕРАГЕНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ СЕВЕРНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

© 2019 А.А. Петрова, Ю.А. Копытенко

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

В статье представлены результаты исследования флюидных систем земной коры Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны северного Забайкалья по аномалиям магнитного поля, силы тяжести и сейсмическим данным. Двумерные модели плотности и намагниченности зон расланцевания и глубинные разрезы золоторудных месторождений позволили выявить местоположение флюидных систем и возможные пути магмо-термофлюидных потоков в древних породах. Установлена специфика флюидных систем на разных глубинных уровнях и роль вертикальных рудоконтролирующих образований земной коры Мамско-Бодайбинской зоны. Предложены диагностические признаки, позволяющие контролировать пути транспортировки флюида к поверхности и местоположение рудогенерирующих структур с учетом флюидо-магматической активности земной коры и мантии. Анализ показал, что Мамско-Бодайбинская зона перспективна на поиски новых рудных объектов. По результатам исследования получена уточненная модель рудолокализации Сухоложского рудного поля, учитывающая влияние глубинных факторов.

Ключевые слова: флюидные системы, магнитные аномалии, золоторудные месторождения.

ВВЕДЕНИЕ

Мамско-Бодайбинская минерагеническая зона, расположенная в Северном Забайкалье (северо-восточная часть Иркутской области) (рис. 1), характеризуется хорошей геологической, петрохимической и геохимической изученностью. В последние десятилетия здесь выявлен новый тип оруденения, в частности, благороднометалльный «сухоложского типа». Гигантское золоторудное месторождение Сухой Лог является южной частью Сухоложского золоторудного поля, включающего ряд месторождений аналогичного типа (Вернинское, Гольец Высочайший и др.) (Вуд, Попов, 2006; Государственная ..., 2010; Коробейников, 2005; Паленова, 2015; Соколов, 2006; Неймарк и др., 1993).

Сейсмический разрез земной коры и верхней части мантии построен через крупнейшее месторождение Сухой Лог (Лишнеvский, Дистлер, 2004). Однако в целом глубинное строение Мамско-Бодайбинской зоны изучено слабо. Ее перспективы оценены не в полной мере из-за недоучета влияния глубинных факторов.

В результате настоящей работы получены новые представления о неоднородностях строения Мамско-Бодайбинской зоны и рудоконтролирующих факторах.

Исследование строения земной коры Мамско-Бодайбинской зоны проведено на основе интерпретации комплекса геофизических данных: аномалий компонент и модуля магнитного поля Земли (МПЗ) (Карта ..., 2000; Копытенко, Петрова, 2018), аномалий силы тяжести (ГИС-Атлас, 2018; Mayer-Gürr et al., 2014) и сейсмических исследований (Лишнеvский, Дистлер, 2004).

По широтной системе профилей были выполнены глубинные разрезы, по зонам расланцевания земной коры и флюидоупорным маркирующим горизонтам построены двумерные плотностные и магнитные модели погруженных срезов. Совместный анализ разрезов и двумерных магнитных и плотностных моделей дал возможность получить объемное представление внутреннего строения земной коры Мамско-Бодайбинской зоны. Оно подчеркнуло ведущую роль в формировании золоторудных месторождений рудообразующих флюидно-

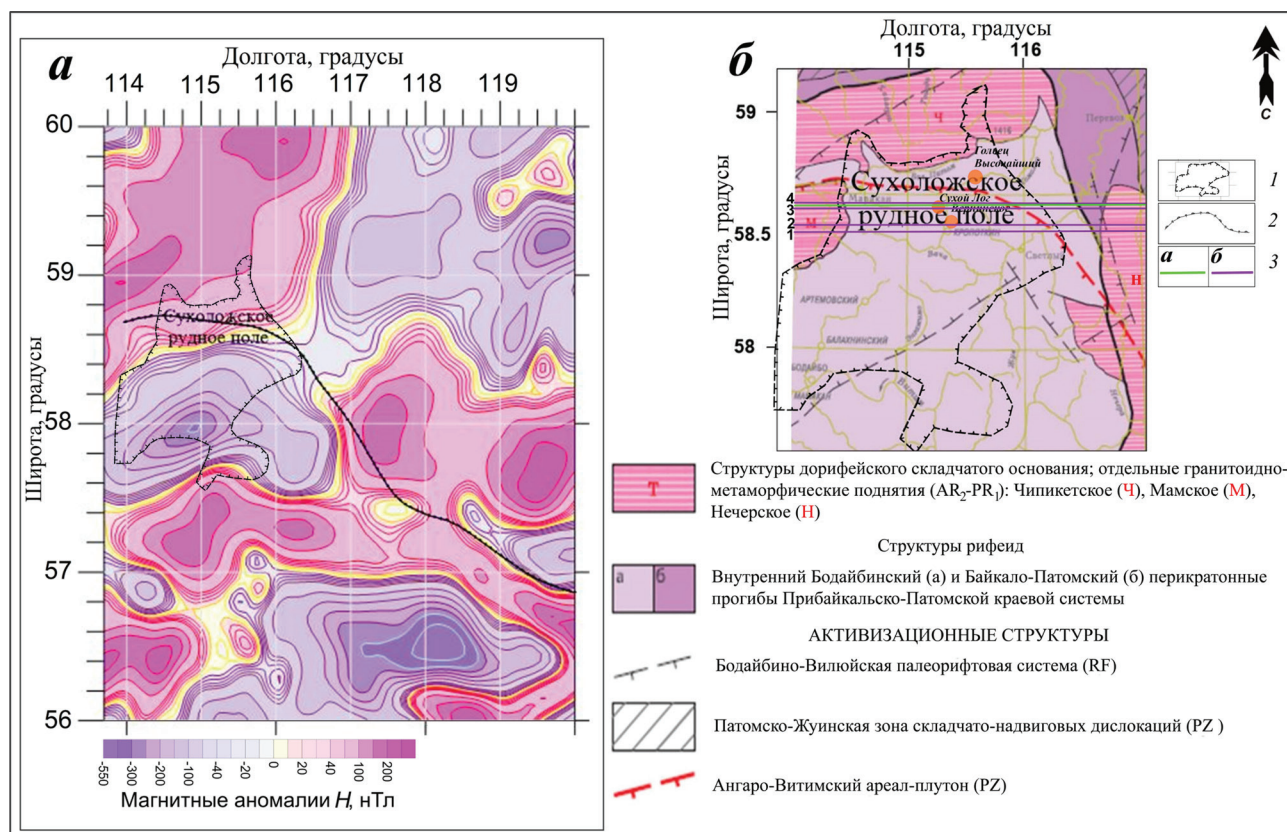


Рис. 1. Аномалии горизонтальной компоненты (Н) МПЗ (Копытенко, Петрова, 2018) (а) и тектоническая схема района исследования (Государственная ..., 2010) (б) с некоторыми изменениями: 1 — Мамско-Бодайбинская минерагеническая зона; 2 — северная граница Ангаро-Витимского плутона; положение профилей: 3 — профили, представленные на рис. 2а и 3б. Залитые кружки — золоторудные месторождения Сухоложского рудного поля.

Fig. 1. Anomalies of the horizontal component (H) EMF (Kopytenko, Petrova, 2018) (a) and tectonic scheme of the study area (State ..., 2010) (with some changes) (b): 1 — Mamsko-Bodaibin mineragenic zone; 2 — northern boundary of the Angaro-Vitimskogo pluton; position of the profiles: 3 — profiles in Fig, 2a and 3b. Painted circles denote gold deposits on the Sukhoy Log ore field.

магматических систем и вертикальных разрывных нарушений. Наибольшее внимание уделено выявлению возможных путей выхода глубинных термофлюидных потоков, играющих основную роль в локализации золоторудных объектов.

Значительное усиление миграции высокотемпературного флюида по разломным зонам с образованием наиболее богатых рудных скоплений в зонах расщепления земной коры Сухоложского рудного поля инициировал Ангаро-Витимский ареал-плутон. Он оказывает четко проявленный структурный контроль воздействия на уникальные объекты благороднометалльной минерализации Сухоложского золоторудного поля, в частности, на месторождение Сухой Лог. Формирование гигантского гранитоидного ареал-плутона произошло под влиянием Ангаро-Витимского батолита мощного палеозойского магматического этапа (Государственная ..., 2010; Сафонов, 2015; Литвиновский и др.1993).

На основе проведенного исследования выявлена значимость влияния северной гра-

ницы Ангаро-Витимского ареала-плутона на магнитные и плотностные свойства земной коры (рис. 1а, 1б). Анализ подтвердил, что в узлах пересечения северо-западной зоны расщепления с вертикальными разломами гранитный плутон способствовал образованию богатых рудных скоплений благодаря миграции флюида постмагматогенно-метаморфогенной природы по разломам Сухоложского рудного поля (Митрофанова, 2010; Хомич, Борискина, 2014).

Визуализация разрезов позволила провести оценку эффективности воздействия Ангаро-Витимского ареала-плутона на изменение магнитных и плотностных свойств земной коры. Плотностные разрезы показали, что инъективные дислокации, связанные с проникновением глубинного вещества в земную кору, привели к разуплотнению в разломных зонах, в результате чего в области Сухоложского золоторудного поля (рис. 1) возникли вертикальные рудоносные магмо-метасоматические колонны протяженностью до 8 км.

В процессе проведенных исследований известных месторождений Сухоложского золоторудного поля (Сухой Лог, Вернинское, Гольец Высочайший) (Государственная ..., 2010; Иркутская ..., 2018; Паленова, 2015) выявлены глубинные факторы рудолокализации: флюидные системы, флюидоподводящие каналы, рудные узлы и рудно-метасоматические колонны. Это позволило разработать систему поисковых геофизических критериев для прогноза потенциально рудоносных участков в зонах выхода вертикальных потоков флюидов из магмо-флюидных систем земной коры.

МАГНИТНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ ДОРИФЕЙСКОГО ФУНДАМЕНТА

Территория Мамско-Бодайбинской зоны характеризуется неоднородным строением дорифейского фундамента и крупных сдвигов различного возраста (рис. 1) (Соколов, 2006). Его фундамент представляет собой коллаж микроконтинентов с раннедокембрийской корой. Главные запасы и прогнозные ресурсы рудного золота сосредоточены в Мамско-Бодайбинской благороднометалльной зоне, которая охватывает рифейский внутренний Бодайбинский прогиб, сформировавшийся над зоной Бодайбино-Вилуйского палеорифта (рис. 1б).

В Мамско-Бодайбинской зоне широко развиты рудогенерирующие процессы, обусловленные глубинной флюидно-магматической активизацией. Эти же процессы определяют закономерность образования и размещения магнитоактивного маркирующего горизонта «магнетитового слоя» в земной коре докембрийского фундамента (Наливкина, 2004; Наливкина, Петрова, 2018). Процесс магнетитообразования происходит в областях гранитизации архейского фундамента. На примере изучения зон флюидной активизации зеленокаменных поясов Фенноскандии показано, что большая часть рудных месторождений золота концентрируется вблизи выходов флюидных каналов, выходящих через блоки докембрийского фундамента из флюидных коровых и мантийных систем (Костомукшский ..., 2015; Petrova et al., 2019).

Исследования аномалий модуля МПЗ выявили, что в докембрийском фундаменте Мамско-Бодайбинской зоны есть магнитоактивный и плотный горизонт. Он тяготеет к подошве гранитного слоя и отвечает уровню, близкому кровле гранитометаморфического слоя, где образует «магнетитовую зону» на глубине около 10–13 км. К северу от 50° с.ш. она проявляется в аномалиях горизонтальной Н-компоненты МПЗ. Аномалии Н-компоненты выявляют «магнетитовые зоны» древнего фундамента, сохранившие

термоостаточную намагниченность. Положительные аномалии Н-компоненты, образованные термоостаточной намагниченностью, отражают намагниченность докембрийских пород, направление и величина которой отличались от современных значений Н-компоненты МПЗ.

С целью выявления блоков докембрийского фундамента и выяснения природы намагниченности построена карта аномалий Н-компоненты МПЗ Мамско-Бодайбинской зоны (рис. 1а) (Копытенко, Петрова, 2018). На севере положительные аномалии Н-компоненты приурочены к древней структуре Чипикетского поднятия (рис. 1б), имеющей докембрийское основание. Благодаря обнаружению маркирующего горизонта «магнетитовой зоны» выделены погруженные блоки раннедокембрийского фундамента. Интенсивные положительные аномалии Н-компоненты (≥ 200 нТл) на юго-востоке Бодайбинского прогиба свидетельствуют о наличии погруженного блока древнего фундамента (рис. 1а). Это позволило найти блоки, подвергшиеся флюидно-магматической активизации еще в докембрии, и возможно, содержащие рудоносные реликты древнего фундамента.

На глубинных разрезах блоки докембрийского фундамента четко выражены в верхней части земной коры. «Магнетитовая зона», расположенная вблизи ее подошвы на глубине 10–13 км, проявляется на разрезах в виде плотных и магнитных горизонтов (Митрофанова, 2010; Наливкина, Петрова, 2018; Соколов, 2006).

В результате интерпретации аномалий модуля и Н-компоненты МПЗ, а также аномалий силы тяжести выделены плотностные и магнитные неоднородности раннедокембрийского фундамента Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны и простирающиеся глубинные разломы древних частей фундамента, контролирующими процессы рудообразования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ ЗЕМНОЙ КОРЫ МАМСКО-БОДАЙБИНСКОЙ ЗОНЫ

Одним из важнейших факторов образования золоторудных месторождений являются флюидные потоки минерализованных растворов, поставляемых глубокофокусными флюидными системами земной коры. Эти потоки, проходя через породы реликтов докембрийского фундамента, выносят высококачественные концентраты к поверхности (Наливкина, 2004; Наливкина, Петрова, 2018).

На этапах метасоматического процесса идет дальнейшее разложение сульфидных минералов и высвобождение из пород ранее заключенных в них благородных металлов. Дополнительный

прирост золота в зоне рудоотложения привносится гидротермальными растворами в процессе гидротермально-метасоматических преобразований вмещающих пород в периоды флюидных активизаций (Коробейников, 2005).

Геолого-структурные и вещественно-морфологические особенности золоторудных проявлений трактуют гидротермальный генезис руд, образовавшихся за счет регенерации и переотложения рудного вещества блоков докембрийских комплексов Мамско-Бодайбинской зоны. Гидротермальная проработка древних комплексов в районе флюидно-магматических активизаций проявляется в виде глубоких минимумов магнитных аномалий (-400 нТл). Следы флюидно-магматических активизаций, четко проявленные в минимумах магнитных аномалий Н-компоненты МПЗ, подчеркивают гидротермальный генезис золоторудных объектов (рис. 1).

С целью изучения неоднородностей глубинного строения рудных объектов по аномалиям модуля МПЗ и аномалиям силы тяжести были рассчитаны магнитные и плотностные разрезы по широтным профилям, пересекающим золоторудные месторождения Сухоложского рудного поля (рис. 1б): Вернинское — 58.54° с.ш., Сухой Лог — 58.65° с.ш., 58.625° с.ш., Гольец Высочайший — 58.76° с.ш.

В основе методики построения глубинных разрезов земной коры лежит спектрально-пространственное представление аномальных полей, конвертируемых в магнитные и плотностные разрезы (Петрова, 1976; Петрова, Петрищев, 2011; Petrova et al., 1992, 2019). Методика применения спектрально-пространственного анализа (СПАН) для формирования магнитной и плотностной модели глубинных разрезов изложена авторами в целом ряде статей. По результатам СПАН на основе материалов высокоточных съемок сделан прогноз коренных месторождений алмазов Урала и Сибирского региона, решены нефтегазопроисследовательские задачи на территории России и в акваториях Северного, Баренцева, Берингова и Средиземного морей (Копытенко, Петрова, 2016; Литвинова, Петрова, 2013; Мавричев, Петрова, 2001; Петрова, Мавричев, 2004; Петрова, Петрищев, 2011; Litvinova, Petrova, 2016; Lyukianova, Petrova, 2014; Petrova et al., 2011).

Разрезы, построенные по СПАН с учетом экспериментально-теоретической зависимости параметров спектральной структуры магнитного поля от глубины залегания магнитоактивных тел, определяют глубины залегания объектов с погрешностью 5–10% (Петрова, Колесова, 1986; Petrova et al., 1992). Разрез позволяет оценить мощность и глубину залегания комплексов, отличающихся по физическим свойствам. Положение маркирующих горизонтов разных

комплексов часто подтверждается отражающими сейсмическими границами с повышенными скоростными характеристиками, а горизонты с резко пониженными магнитными и плотностными свойствами соответствуют зонам инверсий скоростей в ослабленных разгрузочных поверхностях разделов. Сопоставление расчетных петромагнитных разрезов с сейсмическими разрезами позволяет опознать конкретные границы раздела сред с разными скоростными характеристиками, связать их с местоположением литолого-стратиграфических комплексов в геологическом разрезе и провести идентификацию выделяемых поверхностей. Расчеты глубин, выполненные по разрезам СПАН, неоднократно подтверждены бурением (более 100 скважин). Спектрально-пространственное представление высокоточных измерений позволяет выделять вертикальные объекты слабомагнитных разностей, прослеживающихся с глубины в несколько километров до дневной поверхности в вещественных комплексах на разных уровнях среза осадочной толщи и фундамента с погрешностью до 10–15 м, начиная с глубины около 25–50 м (Мавричев и др., 2011).

На плотностных и магнитных разрезах отражаются флюидные системы, зоны рассланцевания земной коры, латеральные и вертикальные разломы и пути миграции термофлюидных потоков. На разрезах они представлены в виде линз пониженной плотности и намагниченности, имеющие толщину от 1 до 3–4 км и протяженность ~30–40 км.

Глубинные разрезы позволили визуализировать местоположения флюидных систем земной коры и мантии месторождения Сухой Лог. Плотностной разрез построен до глубины 150 км, магнитный разрез — до глубины 50 км (рис. 2). По магнитным разрезам получена оценка намагниченности пород земной коры, по плотностным разрезам — плотности пород земной коры и мантии. Местоположения флюидных систем и каналов флюидной проработки оценены по магнитным и плотностным разрезам. Следы миграции минерализованных потоков проявлены в виде слабомагнитных подводящих каналов и линз пониженной плотности. В низах коры и мантии, где из-за высоких температур (более 560°C) породы находятся в размагниченном состоянии, местоположение флюидных систем определено по плотностным разрезам (рис. 2б) (Петрова, Колесова, 1983; Petrova et al., 2019).

Анализ глубинных разрезов через центры золоторудных месторождений показал, что основным фактором образования ареалов флюидно-магматической проработки является вертикальный флюидный поток, имеющий подпитку из глубокофокусных флюидных систем.

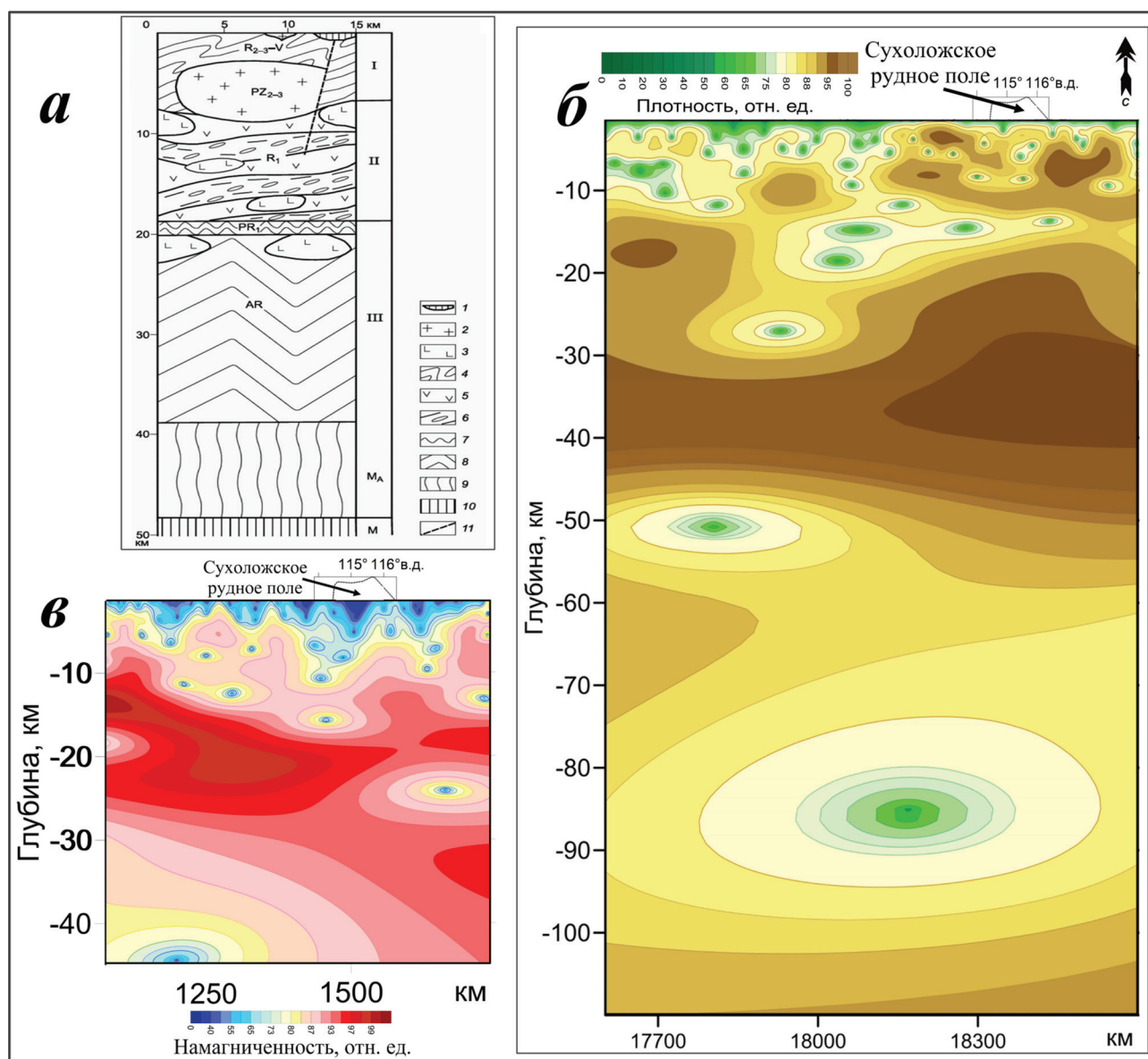


Рис. 2. Разрезы через месторождение Сухой Лог: *a* — сейсмогеологический разрез по (Лишнеvский, Дистлер, 2004); *б* — плотностной разрез; *в* — магнитный разрез (положение профиля представлено на рис. 1): 1 — месторождение Сухой Лог; 2 — Угаханский гранитный батолит; 3 — интрузивные тела базитов-гипербазитов (положение показано условно); 4 — складчатый терригенно-карбонатный комплекс Бодайбинского синклиория; 5, 6 — рифейский рифтогенный комплекс: 5 — базальты, 6 — метатерригенные породы с большим содержанием гематита и магнетита; 7 — раннепротерозойские метатерригенные породы; 8 — архейский гранулит-базитовый комплекс; 9 — выступ активизированной мантии (МА); 10 — мантия (М); 11 — предполагаемый глубинный разлом — рудоподводящий канал. I—III — выделенные слои земной коры: I — средневерхнерифей-вендские терригенно-карбонатные комплексы, II — нижнерифейский рифтогенный комплекс, III — архей-протерозойский гранулит-базитовый слой.

Fig. 2. Sections through the Sukhoy Log field: *a* — seismic-geological section based on (Lishnevsky, Distler, 2004), *б* — density section; *в* — magnetic section (profile position in fig. 1b): 1 — Sukhoy Log deposit; 2 — Ugahan granite batholite; 3 — intrusive bodies of basite-hyperbasites (position shown conventionally); 4 — folded terrigenous-carbonate complex of the Bodaibin synclinorium; 5, 6 — Riphean rift complex: 5 — basalts, 6 — metaterrigenous rocks with a high content of hematite and magnetite; 7 — Early Proterozoic metaterrigenous rocks; 8 — Archean granulite-basic complex; 9 — protrusion of the activated mantle (MA); 10 — mantle (M); 11 — the estimated deep fault — ore channel. I — III — isolated layers of the earth's crust: I — Middle-Upper Vephy-Vendian terrigenous-carbonate complexes, II — Lower Riphean rift complex, III — Archaean-Proterozoic granulite-basic layer.

Плотностные и магнитные разрезы позволили выявить флюидные системы разных глубинных уровней залегания. На плотностном разрезе, пересекающем месторождение Сухой Лог, возможна подпитка с пяти уровней глубин флюидных систем: из верхнекоровой с глубины 8–10 км, из среднекоровой с глубины 14–16 км, из нижнекоровой с глубины 28–30 км и глубокофокусных мантийных систем с глубин 50 км и 90 км (рис. 2). На магнитном разрезе они проявляются в виде цепочек слабомагнитных линз верхней коры: на глубине около 15 км в средней коре, на глубине около 25 км в низах коры и на глубине ~40 км в мантии.

На глубинных разрезах в верхней части земной коры Сухоложского рудного поля наблюдается вертикальная раздробленность и горизонтальная расслоенность пород. Вертикальные разломы проявляются на границах блоков, отличающихся по физическим характеристикам. Траектория глубинного разлома, проходящего через земную кору от мантии (Лишневский, Дистлер, 2004), трассируется по цепочке разуплотненных линз. Разуплотненные слабомагнитные линзы ослабленных горизонтов пересекаются вертикальными флюидными каналами разломных зон. Глубокофокусные флюидные системы на глубине 50 км и 90 км выступают в качестве пульсирующего спускового механизма воздействия флюидных потоков на породы древнего фундамента через зоны вертикальных разломных нарушений.

Сопоставление сейсмического и плотностного разрезов земной коры и мантии, проходящих через месторождение Сухой Лог, показало, что все основные границы сейсмического разреза соответствуют плотностным контактам контрастных поверхностей. Предположение «о вовлечении в рудогенез пород нижнерифейского мафического комплекса, представленного покровами базальтов и телами гипербазитов, под влиянием горячей точки мантии» сделано по сейсмическим, геологическим и геохимическим исследованиям (Лишневский, Дистлер, 2004; Неймарк и др., 1993). Оно согласуется с представлениями, полученными по магнитным и плотностным глубинным разрезам (рис. 2). На глубине около 15 км выделяется коровая флюидная система в виде слабомагнитной линзы пониженной плотности. Возможно, что она подпитывает флюидный канал, выходящий с 10–13 км к золоторудной зоне. Кроме того, предполагается, что глубинный разлом, выделенный на сейсмическом разрезе, является «рудоподводящим каналом» (Лишневский, Дистлер, 2004). Разлом находит свое подтверждение на магнитном и плотностном разрезе, где он приурочен к верхнекоровому флюидному каналу.

В низах верхней коры, начиная с глубины 13 км, на магнитном разрезе выделяется субвертикальная зона нарушений (рис. 2б, 2в). Она неоднократно подвергалась гидротермальным проработкам, которые проявились в виде цепочки линз, выходящих в область месторождений Сухоложского золоторудного поля. Термофлюидные потоки, многократно проходя через подошву верхней коры, значительно уменьшили магнитные свойства пород «магнетитовой зоны». Тем не менее, горизонт «магнетитовой зоны» сохранился на плотностных разрезах в виде уплотненного слоя подошвы верхней коры на глубине 10–13 км (рис. 2б, 2в, 3).

Анализ плотностных и магнитных разрезов позволил уточнить основные черты строения зоны АУ-оруденения черносланцевого типа и выявить специфические признаки флюидных систем разных глубинных уровней. Плотностные разрезы подтвердили предположение о рудообразовании месторождений типа Сухого Лога источниками как коровых, так и мантийных флюидных систем (Лишневский, Дистлер, 2004). Магмы гранитоидов, являясь источником гидротермальных и флюидных потоков, создали условия для образования богатых золоторудных месторождений (Литвиновский и др., 1993; Митрофанова, 2010; Сафонов, 2015).

С целью проверки выдвинутых предположений о существовании «рудоподводящего канала» построены плотностные разрезы через Сухоложское золоторудное поле по широтной системе профилей от 58.60° с.ш. до 58.70° с.ш. Глубинные разрезы позволили определить местоположение и особенности простирания зоны вертикальных разрывных нарушений. Приуроченный к ней термофлюидный канал прослеживается с глубины 25–28 км и пересекает ослабленные потенциально рудоносные горизонты рассланцевания верхней коры на глубинах около 8 и 5 км (рис. 3). На глубине 3 км вертикальная разломная зона сечет флюидоупорный горизонт, перекрывающий флюидные каналы. В рудных узлах, образованных на участках пересечения зон рассланцевания с вертикальными разрывными нарушениями, находятся наиболее богатые рудные скопления Сухоложского золоторудного поля.

Выделяемые на плотностных разрезах мощные глубинные флюидные системы и вертикальные разрывные нарушения, возможно, представляют собой основные источники и главный проницаемый канал для прохождения рудоносных растворов, сформировавших месторождения Сухоложского рудного поля. Изотопно-геохимические исследования свидетельствуют о глубинном коровом источнике золота месторождения Сухой Лог (Неймарк и др., 1993),

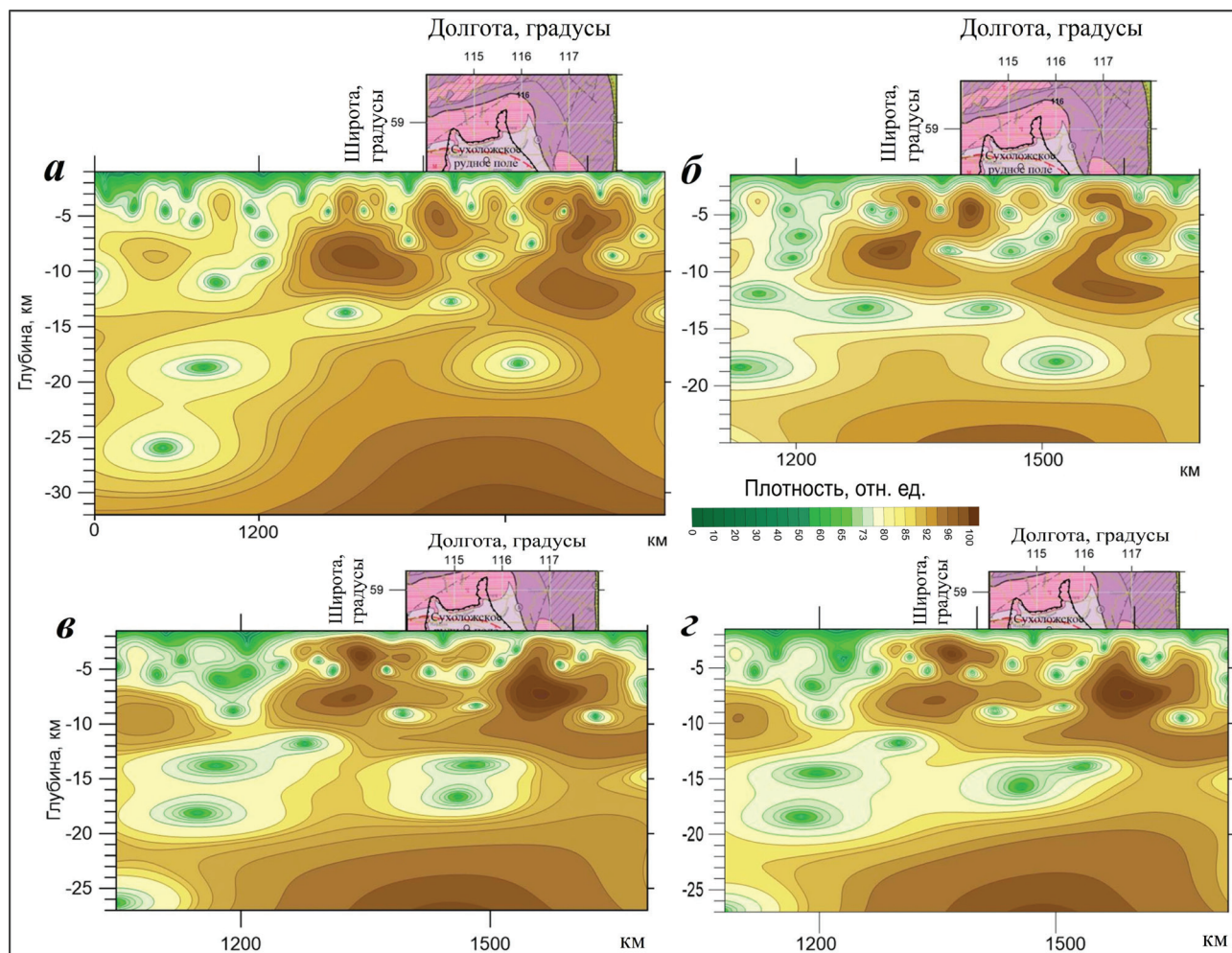


Рис. 3. Плотностные разрезы по широтным профилям: 1 — 58.50° с.ш. (а); 2 — 58.54° с.ш. (б); 3 — 58.60° с.ш. (в); 4 — 58.625° с.ш. (г) на тектонической схеме Мамско-Бодайбинской зоны (Государственная ..., 2010) (с некоторыми изменениями). Положение профилей и условные обозначения к схеме представлены на рис. 1б.

Fig. 3. Density sections along latitudinal profiles: 1 — 58.50°N (a); 2 — 58.54°N (б); 3 — 58.60°N (в); 4 — 58.625°N (г) on the tectonic scheme of the Mamsko-Bodaibin zone (State..., 2010) (with some changes). Position of the profiles and the legend to the scheme in fig. 1б.

а присутствие платиноидов — о мантийном источнике флюидов (Лишне́вский, Дистлер, 2004; Хомич, Борискина, 2014). Пульсирующие тектонические напряжения глубокофокусных флюидных систем, выступают в качестве химического реагента удаления газообразных продуктов, что резко ускоряет процесс восстановления золота из его комплексных соединений.

РУДНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ КОЛОННЫ АНГАРО-ВИТИМСКОГО АРЕАЛА-ПЛУТОНА

Важнейшее значение для тектоники и металлогении имеет крупное тело гранитоидов Ангаро-Витимского ареала-плутон (рис. 1). Его мощность составляет 5–7 км, в местах магмоподводящих каналов — до 10–30 км. Гранитоиды батолита являются типичными мезоабиссальными образованиями, глубина

становления которых оценивается в 10–15 км. (Государственная ..., 2010).

На основе анализа глубинных разрезов выявлено многостороннее влияние границы гранитоидов Ангаро-Витимского ареала-плутон на магнитные и плотностные свойства пород земной коры. На глубинных разрезах по границе ареала-плутон четко выделяются каналы прохождения термофлюидных потоков и рудно-метасоматические колонны в виде зон пониженных значений намагниченности и плотности (рис. 3). Гранитный плутон инициировал усиление миграции высокотемпературного флюида постмагматогенно-метаморфогенной природы по вертикальным разломам, способствуя образованию богатых рудных скоплений Сухо́байского золоторудного поля (Литвиновский и др., 1993; Митрофанова, 2010).

В результате анализа глубинных разрезов выделены основные термофлюидные каналы

разломных зон Мамско-Бодайбинской провинции, определено простираие и протяженность рудно-метасоматических колонн. Магмо-метасоматические системы такого типа возникли благодаря термофлюидным потокам при процессах растяжения. Рудоносные магмо-метасоматические колонны на плотностных разрезах имеют вид зон пониженной плотности протяженностью до 8 км (рис. 3).

Геологические изыскания показали, что рудоносные формации магмо-метасоматических колонн Мамско-Бодайбинской зоны тяготеют к глубинным разломам на фоне длительно развивавшихся мантийно-коровых палеодиапиров под воздействием нагретых флюидных потоков в зонах расколов земной коры и мантии (Вуд, Попов, 2006; Коробейников, 2005). Магматические процессы сопровождались метасоматическими явлениями с образованием крупных рудно-метасоматических колонн протяженностью 3–5 км и 7–9 км над магмо-флюидными системами приразломных зон. На разрезе по широте 58.50° с.ш. (рис. 3а) выделяется субвертикальное разрывное нарушение, прослеживающееся от нижнекоревой флюидной системы с глубины 25–28 км. Оно представлено мощным термофлюидным каналом, связывающим флюидные системы нижней и верхней частей коры при прохождении рудоносных растворов, сформировавших месторождение Сухой Лог.

Крупные и гигантские месторождения Сухоложского рудного поля образовались под воздействием длительного поступления термофлюидопотоков по каналам. Это обеспечило перераспределение, обмен и подъем рудных компонентов боковых пород по пути продвижения нагретых флюидов. Вынос благородных металлов из боковых пород докембрийского фундамента достигает 30–50 % (Коробейников, 2005).

ДВУМЕРНЫЕ МОДЕЛИ НАМАГНИЧЕННОСТИ И ПЛОТНОСТИ ЗОН РАССЛАНЦЕВАНИЯ

Геологические и геохимические исследования показали, что важной рудоконтролирующей структурой Сухого Лога является региональная зона рассланцевания северо-западного простираия (Вуд, Попов, 2006; Паленова, 2015; Сафонов, 2015; Хомич, Борискина, 2014).

Для уточнения пространственного местоположения зон рассланцевания и оценки плотностных и магнитных свойств флюидоупорного маркирующего горизонта, перекрывающего флюидные каналы, на площади Мамско-Бодайбинской зоны рассчитаны двумерные модели намагниченности и плотности пород на разных глубинных уровнях. Расчет моделей выполнен по

магнитным аномалиям модуля МПЗ (Карта ..., 2000; Копытенко, Петрова, 2018) и аномалиям силы тяжести (Эринчек и др., 2008; Mayer-Gürr et al., 2014). Основные рудогенерирующие и рудоконтролирующие структуры земной коры исследованы на основе анализа площадного распределения магнитных и плотностных неоднородностей с учетом глубинных разрезов и геологической информации. Результаты представлены в виде моделей плотности и намагниченности на уровнях глубин 2–3 км, 4–5 км, 8–10 км и 14–16 км (рис. 4, 5) и широтных глубинных разрезов (рис. 2, 3).

С целью изучения особенностей простираия разрывных нарушений в верхней части земной коры выбрана оптимальная глубина срезов 2.5 и 5 км, рассчитанная на основе параметров спектральной структуры аномальных полей с учетом характера слоистости среды. Оптимальная глубина для срезов проявляется на разрезах в виде горизонтальных зон, отвечающих положению минимумов спектральной структуры, зависящей от интенсивности магнитных аномалий и плотностных свойств пород зон рассланцевания. На разрезах эти зоны отражены в виде слабомагнитных слоев с пониженными значениями плотности (рис. 3).

На двумерных моделях (срезах) распределения намагниченности и плотности пород зоны рассланцевания выделяются в виде слабомагнитных ареалов и ареалов пониженной плотности (рис. 4). На глубине 2.5 км они ассоциируются с активными проявлениями гидротермальных процессов в зонах выхода термофлюидных потоков. Распределение слабомагнитных и разуплотненных ареалов на глубине 5 км приурочено к региональной зоне широтного рассланцевания, являющейся рудоконтролирующей структурой Сухоложского рудного поля (рис. 3). Месторождение контролируется широтным разломом фундамента. В плотностных и магнитных срезах на глубине 5 км, помимо субширотных простираий, прослеживаются также северо-восточные нарушения (рис. 4), которые по геологическим данным, вероятнее всего, были заложены в раннепротерозойское время (Соколов, 2006).

Таким образом, на глубине 5 км проявлены магнитные и плотностные особенности широтной рассланцеванной зоны рудоконтролирующей структуры Сухоложского рудного поля. Ее простираие нарушено северо-восточными и северо-западными разломными нарушениями. Центры зон минимумов приурочены к узлам пересечения разломных нарушений разного простираия, что существенно для прогноза продуктивности оруденения и выявления рудных узлов. Зоны флюидно-магматических акти-

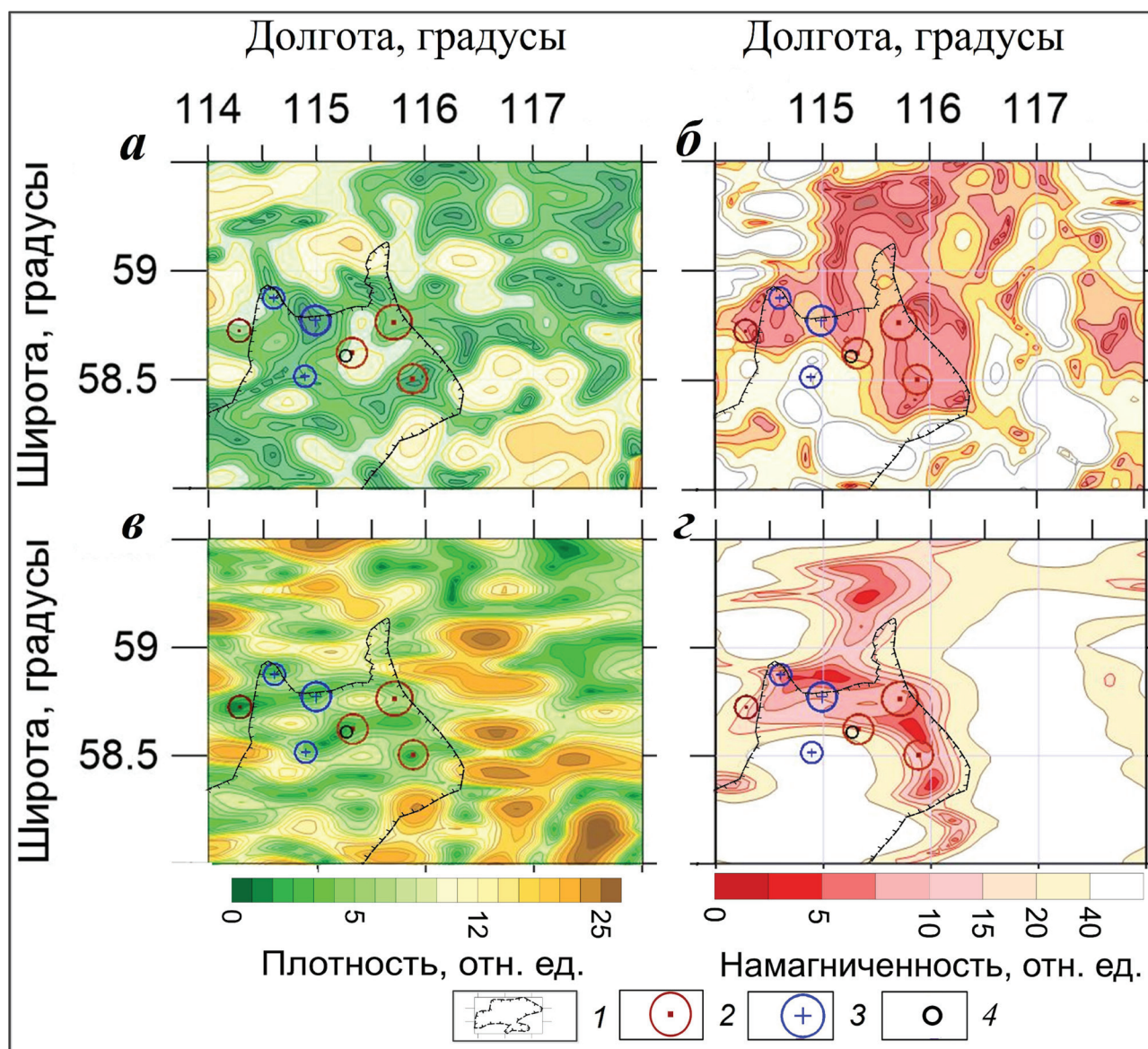


Рис. 4. Центры перспективных участков. Двумерные модели плотности (а) и намагниченности (б) рудоконтролирующих структур на глубине 2.5 км; модели плотности (в) и намагниченности (г) рудоносной зоны расланцевания на глубине 5 км: 1 — Мамско-Бодайбинская минерагеническая зона; 2 — участок 1-ой очереди; 3 — участок 2-ой очереди; 4 — месторождение Сухой Лог.

Fig. 4. Centres of prospective areas. Two-dimensional models of density (a) and magnetization (б) of ore-controlling structures at a depth of 2.5 km; density models (в) and magnetization (г) of the ore-bearing schistosity zone at a depth of 5 km.: 1 — of the Mamsko-Bodaibin zone; 2 — area of the 1 stage; 3 — area of the 2 stage; 4 — Sukhoi Log deposit.

визаций и интенсивного флюидопотока проявляются на магнитных срезах в виде минимумов поля (рис. 4, 6).

Благоприятные условия для продолжительной циркуляции рудоносных растворов и последующего рудоотложения были созданы благодаря наличию крупных рудовмещающих высокопроницаемых приразломных зон в сочетании со структурными и литологическими экранами — флюидоупорными маркирующими горизонтами. По результатам распределения плотностных неоднородностей в верхней коре получены данные о плотностных свойствах

флюидоупорных слоев, создающих на глубине 3 км, 5–7 км и 8 км уплотненные маркирующие горизонты, перекрывающие разломные зоны флюидных каналов (рис. 3б).

На основе анализа срезов земной коры по зонам расланцеваний и глубинных разрезов уточнено местоположение, простирание, магнитные и плотностные свойства основной рудоконтролирующей структуры Сухоложского рудного поля (рис. 4). Она представляет собой зону расланцевания на глубине 4–5 км (Коробейников, 2005; Лишнеvский, Дистлер, 2004; Паленова, 2015).

На глубинных разрезах просматриваются более глубокозалегающие зоны рассланцевания — на глубинах 8 км и 10 км (рис. 3, 5б, 5в). Возможно, что эти горизонты рассланцевания верхней коры являются промежуточными зонами «разгрузки» глубинных нагретых флюидов, накопления, переотложения и перераспределения рудных элементов. На рис. 5 показано расположение границы Ангаро-Витимского ареала-плутона и разрывных нарушений палеорифта (тектоническая схема (рис. 5а)) относительно линз флюидных систем в верхней коре на глубине 8 км (рис. 5б) и 10 км

(рис. 5в) и в средней коре — на глубине 15 км (рис. 5г).

В средней части земной коры по глубинным разрезам выделена горизонтальная слоистость на глубине ~15 км. Там расположена мощная флюидная система, приуроченная к центру месторождения Сухой Лог (рис. 3, 5г). Рудно-метасоматическая колонна Сухого Лога имеет протяженность по вертикали ≥5 км. На глубине ~3 км она перекрывается флюидоупорным горизонтом (рис. 6б).

Динамику взаимодействия флюидных систем, расположенных на глубинах 10–15 км,

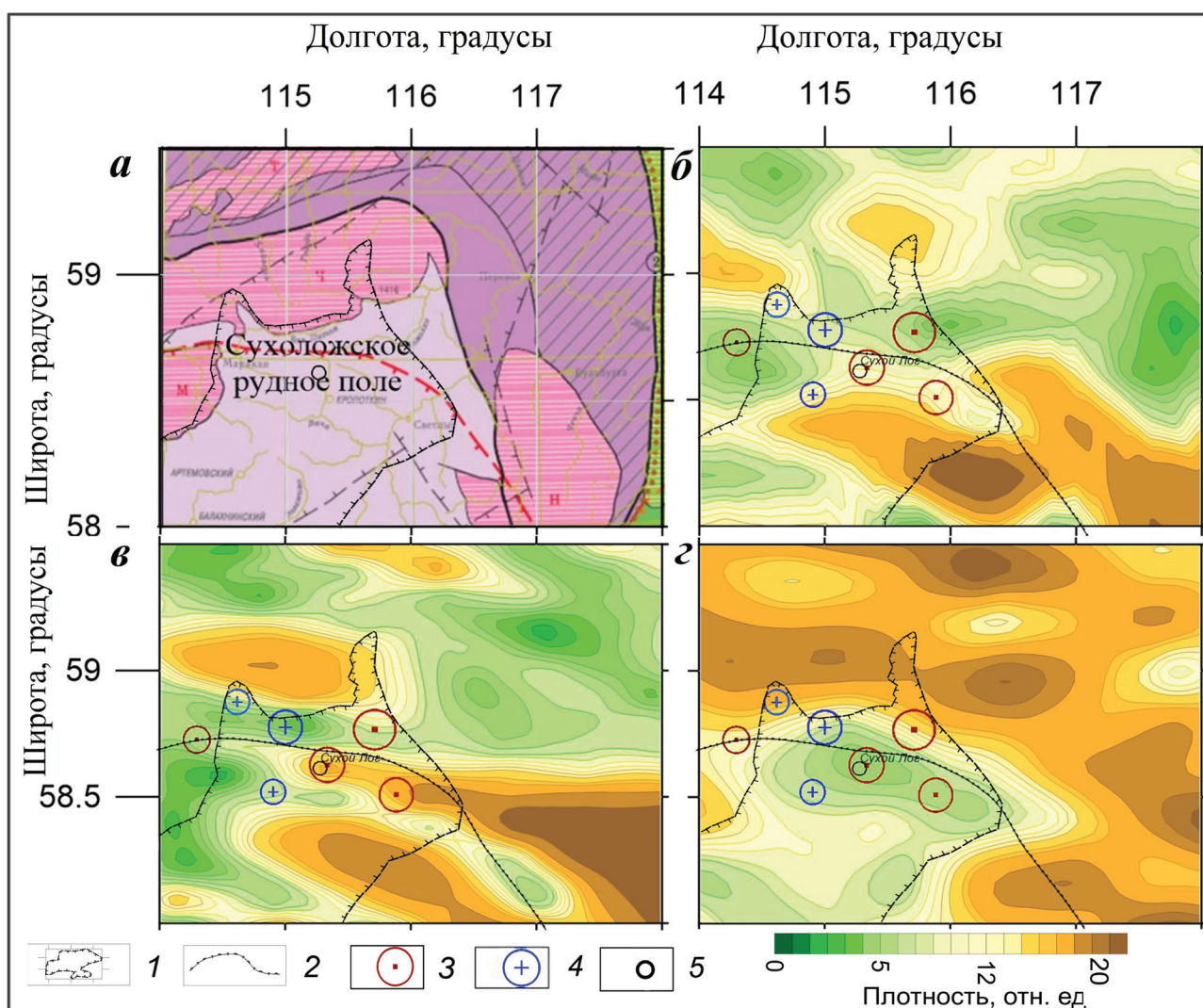


Рис. 5. Перспективные участки Сухоложского золоторудного поля. Фрагмент тектонической схемы Мамско-Бодайбинской зоны (Государственная ..., 2010) с некоторыми изменениями (а) и модели плотности флюидных систем, подпитывающих перспективные участки в верхней коре на уровнях глубин 8 км (б) и 10 км (в) в средней коре на уровнях глубин 15 км (г): 1 — Мамско-Бодайбинская минерагеническая зона; 2 — северная граница Ангаро-Витимского плутона; 3 — участок 1-ой очереди; 4 — участок 2-ой очереди; 5 — месторождение Сухой Лог.

Fig. 5. Prospective areas of the Sukholozhskoye gold field. Fragment of the tectonic scheme of the Mamsko-Bodaibin zone (a) (State..., 2010) (with some changes). Density models of fluid systems that feed promising areas in the upper crust at depth levels of 8 km (б) and 10 km (в), in the middle crust at the level of 15 km (г): 1 — The Mamsko-Bodaibin mineralogenic zone; 2 — The northern border of the Angaro-Vitimskogo pluton; 3 — a zone of the first priority; 4 — a zone of the second priority; 5 — Sukhoi Log deposit.

с субвертикальными термофлюидными каналами можно оценить по системе широтных разрезов, секущих ареалы зоны рассланцевания на глубине ~5 км (рис. 6).

Рудные узлы, разломные зоны и области «разгрузки» флюидов в горизонтах рассланцевания четко выделяются в моделях намагниченности и на плотностных разрезах (рис. 6). Рудные узлы приурочены к глубинным разломам на участках активного разуплотнения пород под влиянием тектонических деформаций, гидротермального метасоматоза и длительного воздействия нагретых мантийно-коровых флюидных потоков (Вуд, Попов, 2006; Иванов, 2010; Паленова, 2015; Юдовская и др., 2011).

Местоположение рудных узлов Сухоложского рудного поля контролируют северо-западные

(близширотные) разломы фундамента, вдоль которых в осадочных толщах сформировались благоприятные для рудолокализации зоны складчатых и разрывных дислокаций. Рудные узлы, где разрывные нарушения разной ориентировки пересечены вертикальными разломами, являются наиболее проницаемыми для гидротермальных растворов. В таких узлах глубинные флюиды, насыщенные Au и элементами платиновой группы, отлагали металлы в зонах рудолокализации (Коробейников, 2005; Соколов, 2006).

Анализ глубинных разрезов показал, что рудные узлы Сухоложского рудного поля расположены над вертикальными разломами фундамента. Так, например, на плотностном разрезе, пересекающем на широте 58.54° с.ш. (месторождение Вернинское) (рис. 6а), вертикальный

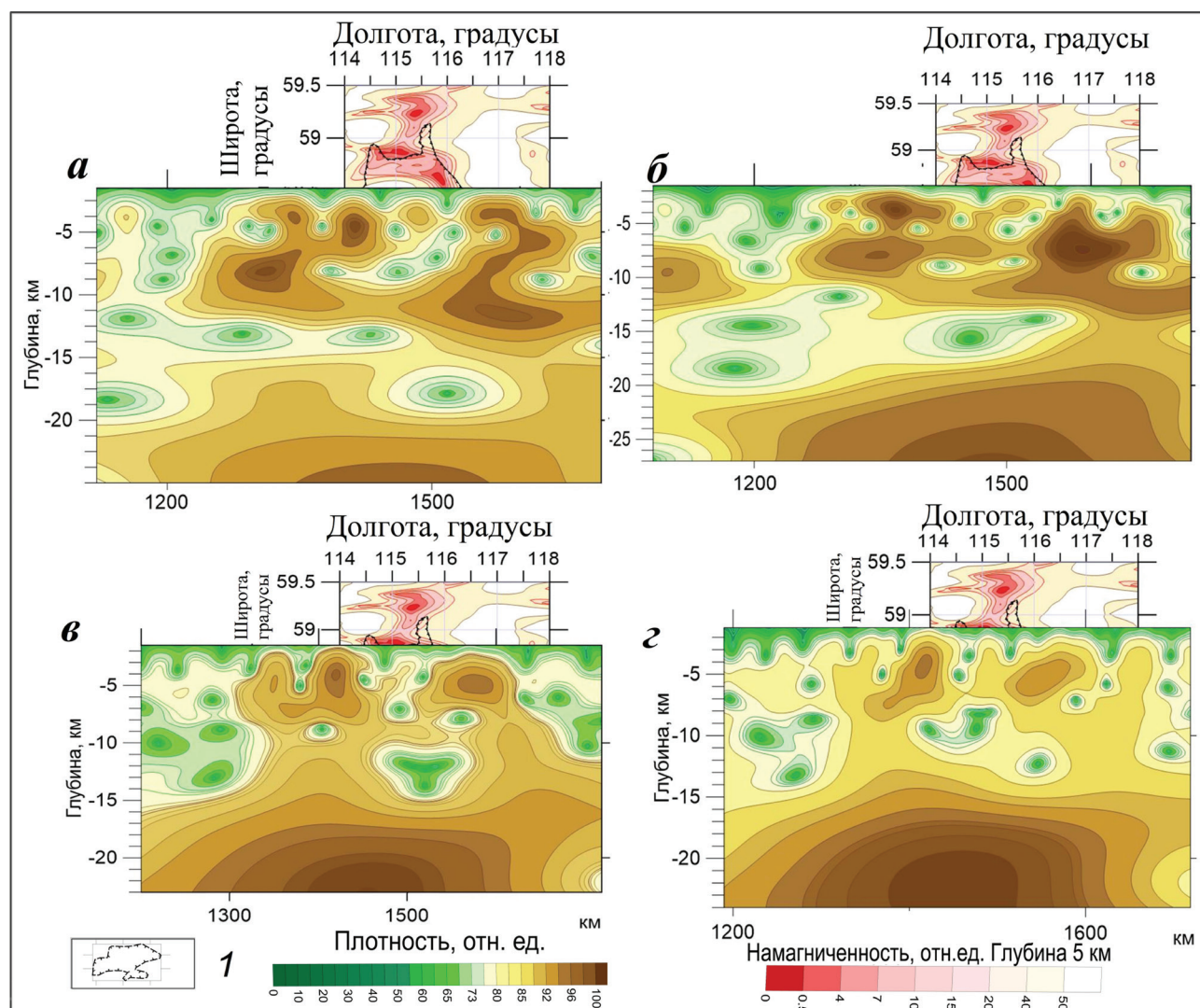


Рис. 6. Плотностные разрезы Мамско-Бодайбинской провинции, пересекающие слабомагнитные ареалы зоны рассланцевания на глубине ~5 км вблизи выходов вертикальных разломов: 58.54° с.ш. (а); 58.625° с.ш. (б); 58.85° с.ш. (в); 58.89° с.ш. (г): 1 — Мамско-Бодайбинская минерагеническая зона.

Fig. 6. Density sections of the Mamsko-Bodaibin province, crossing the weakly magnetic areas of the schistosity zone at a depth of ~5 km near the outcrops of vertical faults: 58.54°N (а); 58.625°N (б); 58.85°N (в); 58.89°N (г): 1 — The Mamsko-Bodaibin mineragenic zone.

термофлюидный канал входит в слабомагнитный ареал на глубине ~5 км, пройдя через ослабленные потенциально рудоносные горизонты рассланцевания на глубинах около 5 км и 9 км. Подпитывающая коровая флюидная система выделяется в интервале глубин 12–15 км.

Севернее, на широте 58.85° с.ш. (рис. 6в), вертикальная подпитка возможна с глубины 13–15 км. Вертикальный термофлюидный канал проходит через ослабленные потенциально рудоносные горизонты рассланцевания, прослеженные по разрезам на глубине около 5 и 8 км. На широте 58.89° с.ш. вертикальная подпитка слабомагнитного ареала предполагается с глубины 10–15 км. Прямой восходящий поток через крупную рудно-метасоматическую колонну прослеживается из линзы с глубины 9 км (рис. 6г), что является признаком высокой перспективности этого участка.

На горизонтальном срезе по глубине 8 км четко выражены северо-западные и субширотные разломы фундамента, на срезе по глубине 10 км — меридиональная и субширотная разломные зоны фундамента. Кроме того, на срезе по глубине 15 км прослеживаются северо-западные и северо-восточные простирания (рис. 5). На глубинных плотностных разрезах эти разнонаправленные зоны нарушений пересечены сквозными глубинными субвертикальными

зонами разломов, выходящими в рудные узлы Сухоложского золоторудного поля (рис. 5–7). Резкая смена простирания разломов внутри фундамента увеличивает трещиноватость и проницаемость слоев земной коры, создавая благоприятные условия для рудогенерации. Рудоконтролирующими структурами являются рудные узлы и трещины межслоевого скольжения зон рассланцевания.

Совместный анализ глубинных разрезов и площадных плотностных срезов позволил получить объемное представление о неоднородностях земной коры и выделить коровые флюидные системы, подпитывающие рудосодержащие толщи зон рассланцевания по вертикальным разломным зонам. На плотностном разрезе по широте 58.76° с.ш. рудно-метасоматическая колонна прослеживается с глубины 8–10 км (рис. 7б). Вертикальный канал, возможно, подпитывается из линзы флюидной системы средней части коры с глубины ~15 км.

Под воздействием вертикального термофлюидного потока из основной среднecоровой линзы флюидной системы с глубины 15 км находится вся южная часть площади Сухоложского рудного поля вплоть до границы Ангаро-Витимского ареала-плутона (рис. 1). Севернее этой границы ($\Phi \geq 58.76^\circ$ с.ш.) вертикальный поток прослеживается только из верхнекоровых линз с глубин

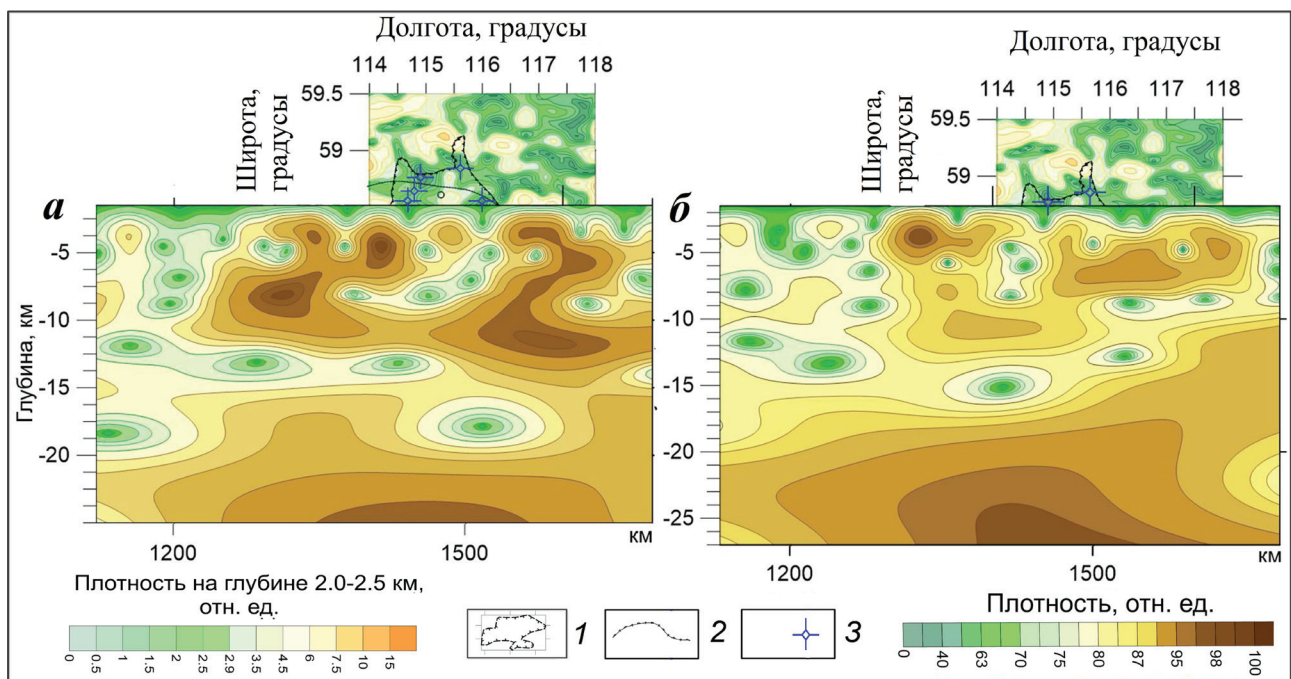


Рис. 7. Плотностные разрезы вдоль широтных профилей (58.54° с.ш. (а), 58.76° с.ш. (б)), секущие трог и ареалы пониженной плотности рудоконтролирующей структуры на глубине ~2.0–2.5 км, приуроченные к субвертикальным разломным зонам: 1 — Мамско-Бодайбинская минерагеническая зона; 2 — северная граница Ангаро-Витимского плутона; 3 — трог и долины.

Fig. 7. Density section along latitudinal profiles (58.54°N (a), 58.76°N (b)), cutting troughs and areas of low density of the ore-controlling structure at a depth of ~2.0–2.5 km, associated with subvertical fault zones: 1 — The Mamsko-Bodaibin mineragenic zone; 2 — The northern border of the Angaro-Vitimskogo pluton; 3 — trough valleys.

8 и 10 км. На северо-западе Сухоложского рудного поля прямой восходящий поток возможен лишь из верхнекоревой линзы с глубины 8 км (рис. 5, 6в, 6г, 7б). Рудоконтролирующая роль вертикальных разломов реализуется через раствороподводящую функцию. По мере удаления от них уменьшаются запасы руды вплоть до полного их исчезновения на расстояниях до 10 км.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЗОНЫ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИННЫХ ФАКТОРОВ

На основе выявленных глубинных факторов рудолокализации для Мамско-Бодайбинской провинции разработана система поисковых геофизических критериев, позволяющая прогнозировать потенциально рудоносные участки в зонах выхода вертикальных потоков флюидов и минерализованных водных растворов из флюидных систем.

На основе анализа распределения коровых флюидных систем провинции, создающих вертикальные подпитки рудосодержащих толщ с разных уровней глубин, сделана оценка степени перспективности участков и очередности геологоразведочных работ (1 и 2-я очередь) (рис. 4–5).

Сухоложское золоторудное поле приурочено к флюидной системе, расположенной на глубине 15 км. Восходящий из нее термофлюидный поток создает благоприятные условия для образования рудоносных колонн в интервале глубин от 2 до 5–8 км. Перспективные участки приурочены к рудным узлам над рудно-метасоматическими колоннами (рис. 4, 5).

Перспективные участки выбраны по результатам анализа моделей намагниченности и плотности по слоям рассланцевания (глубина 2 км, 5 км, 8–9 км) и по горизонтам флюидоупоров (глубина ~3 км, 8 км и 10 км) с учетом глубинных разрезов земной коры. Эти участки рекомендованы для постановки прогнозно-поисковых геологоразведочных работ на рудные объекты, подпадающие под влияние глубинных факторов (рис. 5).

Особый интерес в Мамско-Бодайбинской провинции представляют погребенные трогги, являющиеся специфическими рудогенерирующими структурами. Геохимические оценки осадочных толщ, образовавшихся над погребенными рифтовыми трогами статистически значимы и достаточны для их геохимической индикации как рудогенерирующих структур (Коробейников, 2005; Юдовская и др., 2011). Вулканогенно-осадочные образования медвежьей свиты выполняют систему рифтовых трогов, погребенных под осадочным чехлом Бодайбинского шельфового прогиба.

Плотностные свойства низов пачки вулканогенно-осадочных образований, заполняющих трогги, четко проявляются на горизонтальном срезе моделей плотности и намагниченности на глубине 2.0–2.5 км (рис. 7). В качестве индикаторов картирования погребенных трогов нами использованы узлы пересечения разломных зон разного простирания на схемах распределения слабомагнитных ареалов и ареалов пониженной плотности. Наиболее глубокие трогги прослеживаются на глубине около 3 км вблизи флюидоупорного горизонта. В результате исследований моделей распределения плотности и намагниченности с учетом глубинных разрезов выделены перспективные участки трогов, имеющих вертикальную глубинную подпитку.

Глубинные разрезы позволили визуализировать особенности внутреннего строения трогов, погребенных под осадочным чехлом. Глубина трогов оценивается по плотностным разрезам. Анализ разрезов показал, что средняя глубина залегания трогов Мамско-Бодайбинской провинции составляет 3–4 км. На разрезах они проявляются в виде зон пониженной плотности. Так, например, на плотностном разрезе $\Phi=58.54^\circ\text{с.ш.}$ (рис. 7а) четко выделяется трог над субвертикальной разломной зоной на восточной границе Мамско-Бодайбинской зоны. На плотностном разрезе $\Phi=58.76^\circ\text{с.ш.}$ (рис. 7б) хорошо выражен трог над вертикальной рудно-метасоматической колонной на границе зоны.

В результате проведенных геофизических исследований глубинного строения земной коры и мантии предложено уточнение локализации золоторудных объектов Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны с учетом особенностей влияния коровых и мантийных глубинных факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования глубинного строения земной коры Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны показали эффективность комплексной технологии интерпретации магнитных аномалий модуля и Н-компоненты МПЗ, аномалий силы тяжести и сейсмических данных.

В результате анализа магнитных и плотностных разрезов земной коры выявлено местоположение глубокофокусных флюидных систем и эндогенных каналов флюидно-магматической проработки древних пород фундамента. Рудоконтролирующая флюидная система Сухоложского золоторудного поля выявлена в средней коре на глубине около 15 км.

Глубинные разрезы земной коры показали, что инъективные дислокации, связанные

с проникновением вещества коровой флюидной системы в земную кору, привели к разуплотнению пород в разломных зонах и образованию рудно-метасоматических колонн. В результате работы выявлены мощные субвертикальные рудоносные магмо-метасоматические колонны протяженностью от 3 до 8 км и флюидоупорные горизонты, перекрывающих рудовмещающие зоны на глубинах 3 км и 6–10 км. В этих структурах возможны благоприятные условия для продолжительной циркуляции рудоносных растворов.

Анализ глубинных разрезов и площадных моделей плотностных и магнитных срезов позволил получить объемное представление о неоднородностях земной коры и выявил разрывные разноориентированные нарушения слоев фундамента на разных глубинных уровнях. Смена простираения разломов слоев, увеличивая трещиноватость, создает благоприятные условия для рудогенерации.

По глубинным плотностным разрезам выявлены сквозные вертикальные разломы с глубиной заложения 10–15 км, рассекающие разнонаправленные разломные зоны горизонтов рассланцевания. Сделано предположение, что именно вертикальные разломы обеспечили длительное воздействие рудообразующих флюидно-магматических систем, обусловившее формирование крупнейших золоторудных объектов Сухоложского рудного поля. Возможно, что богатые месторождения являются следствием выноса по вертикальным зонам высококачественных концентратов докембрия флюидными потоками минерализованных водных растворов, поставляемых под пульсирующим воздействием глубокофокусных флюидных систем мантии с глубины >50 км.

В результате исследования выделены погребенные трогии, являющиеся специфическими рудогенерирующими структурами Мамско-Бодайбинской зоны. Оценка глубины залегания трогов по плотностным разрезам показала, что она составляет 3–4 км. В качестве индикаторов картирования погребенных трогов использованы слабомагнитные ареалы и ареалы пониженной плотности в интервале глубин 2.5–3.0 км.

В процессе исследований Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны получены диагностические закономерности, учитывающие глубинные факторы контроля АУ-оруденения. Проведенные работы подтвердили, что район перспективен для выявления новых золоторудных объектов. На основе выявленных глубинных факторов рудолокализации предложена система поисковых геофизических критериев, позволяющая прогнозировать потенциально рудоносные участки.

В результате применения комплексной технологии интерпретации геофизических данных получены новые представления о слоистости и вертикальной раздробленности строения земной коры Мамско-Бодайбинской провинции с учетом особенностей глубинных факторов, многократно усиленных влиянием Ангаро-Витимского плутона. Выявлены проводящие каналы воздействия на ослабленные горизонты верхней коры. Каналы выводят из флюидных систем с глубины 8 км, 10 км и 15 км вертикальные флюидные потоки. Это позволило уточнить перспективы новых потенциально рудоносных участков и рекомендовать детальные электроразведочные работы в зонах выхода глубинных вертикальных каналов.

По результатам проведенных геофизических исследований глубинного строения земной коры и мантии получена уточненная модель локализации золоторудных объектов Мамско-Бодайбинской минерагенической зоны с учетом особенностей влияния глубинных факторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания 0037 2014 0005.

Список литературы [References]

- Вуд Б.Л., Попов Н.П. Гигантское месторождение золота Сухой Лог (Сибирь) // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. Вып. 3. С. 315–341 [Wood B.L., Popov N.P. The giant Suknoi Log gold deposit (Siberia) // Russian Geology and Geophysics. 2006. V. 47. Iss. 3. P. 315–341].
- ГИС-Атлас «Недра России», 2018. [GIS-Atlas «Nedra of Russia», 2018. <http://atlaspacket.vsegei.ru> (in Russian)].
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1: 1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-50 — Бодайбо. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 612 с. [State geological map of the Russian Federation in scale 1: 1 000 000 (third generation). Series Aldano-Zabaykalskaya. List O-50 — Bodaybo. Obyasnitelnaya zapiska. SPb.: Kartograficheskaya fabrika: VSEGEI, 2010. 612 p. (in Russian)].
- Иркутская область. Карта размещения перспективных площадей стратегических и остродефицитных видов сырья с учтенными ресурсами // ВСЕГЕИ. Электронный ресурс. 17.08.2018 [Irkutsk region. Location map of promising areas of strategic and critical types of raw materials with accounted resources // VSEGEI. Elektronnyy resurs. 08/17/2018 (in Russian)].
- Иванов А.И. Золотоносность Байкало-Патомской металлогенической провинции // Автореф. дисс. докт. геол.-мин. наук. Москва. 2010. 51 с. [Ivanov A.I. Gold-bearing of the Baikal-Patom metallogenic

- province // Avtoref. diss. dokt. geol.-min. nauk. Moscow. 2010. 51 p. (in Russian)].
- Карта аномального магнитного поля России и сопредельных государств с объяснительной запиской на карте. Масштаб 1:5 000 000 / 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. Masshtab 1: 5,000,000 / Ed. T.P. Litvinova. SPb: Izd-vo VSEGEI, 2000 (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. 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. Iss. 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. <http://dx.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. Iss. 4. P. 34–41 (in Russian)].
- Коробейников А.Ф. Условия образования крупных и гигантских золоторудных месторождений // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 309. № 2. С. 14–22 [Korobeynikov A.F. Formation conditions of large and giant gold deposits // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2005. V. 309. Iss. 2. P. 14–22 (in Russian)].
- Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минерогения) // Отв. Редакторы Горьковец В.Я., Шаров Н.В. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 323 с. [Kostomukshsky ore region (geologiya, glubinnoe stroenie i minerogeniya) // Ed. Gorkovets V.Ya., Sharov N.V. Petrozavodsk: Karelskiy nauchnyiy tsentr RAN, 2015. 323 p. (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. Iss. 54. P. 17–24 (in Russian)].
- Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Алакшин А.М. и др. Ангаро-Витимский батолит — крупнейший гранитоидный плутон. Новосибирск: Изд-во ОИГГМ СО РАН, 1993. 141 с. [Litvinovsky B.A., Zanzvilevich A.N., Alakshin A.M. et al. Angaro — Vitim batholith - the largest granitoid pluton. Novosibirsk: Izd-vo OIGGM SO RAN, 1993. 141 p. (in Russian)].
- Лишневецкий Э.Н., Дистлер В.В. Глубинное строение земной коры района золото-платинового месторождения Сухой Лог по геолого-геофизическим данным (Восточная Сибирь, Россия) // ДАН. 2004. Т. 46. № 1. С. 88–104 [Lishnevsky E.N., Distler V.V. The deep structure of the earth's crust in the Sukhoi Log gold-platinum deposit region according to geological and geophysical data (Eastern Siberia, Russia) // Doklady Earth Sciences. 2004. V. 46. Iss. 1. P. 88–104 (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 nedr. 2001. Iss. 9. P. 14–18 (in Russian)].
- Мавричев В.Г., Безукладнов В.А., Петрова А.А. Поиски месторождений гипергенных руд комплексной аэрогеофизической съемкой // Георесурсы. 2011. №1. С. 56–61 [Mavrichev V.G., Bezukladnov V.A., Petrova A.A. Search for deposits of hypergene ores by complex aerogeophysical survey // Georesursy. 2011. Iss. 1. P. 56–61 (in Russian)].
- Митрофанова Н.Н. Ангаро-Витимский ареал-плутон: к проблеме генезиса и возраста // Региональная геология и металлогения. 2010. № 43. С. 5–12. [Mitrofanova N.N. Angaro-Vitim area-pluton: to the problem of genesis and age // Regionalnaya geologiya i metallogeniya. 2010. Iss. 43. P. 5–12 (in Russian)].
- Наливкина Э.Б. Эволюция раннедокембрийской земной коры. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 204 с. [Nalivkina E.B. Evolution of the Early Precambrian crust. SPb: Izd-vo VSEGEI, 2004. 204 p. (in Russian)].
- Наливкина Э.Б. Критерии рудоносности раннедокембрийской земной коры континентов. СПб.: изд-во ВСЕГЕИ, 2015. 79 с. [Nalivkina E.B. Ore-bearing criteria for the early Precambrian crust of the continents. SPb: Izd-vo VSEGEI, 2015. 79 p. (in Russian)].
- Наливкина Э.Б., Петрова А.А. Магнетитовая зона земной коры континентов. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2018. 46 с. [Nalivkina E.B., Petrova A.A. The magnetite zone of the continental crust. SPb: Izd-vo VSEGEI, 2018. 46 p. (in Russian)].
- Неймарк Л.А., Рыцк Е.Ю., Гороховский Б.М. Геохронологическое и изотопно-геохимическое изучение золоторудных месторождений Байкальской складчатой области // Изотопное датирование эндогенных формаций. М.: Наука. 1993. С. 124–146 [Neymark L.A., Rytsk E.Yu., Gorokhovskiy B.M. Geochronological and isotopic-geochemical study of

- gold deposits in the Baikal folded region // *Izotopnoe datirovanie endogennykh formatsiy*. M.: Nauka. 1993. P. 124–146 (in Russian)].
- Паленова Е.Е.* Минералогия месторождений золота Копыловское, Кавказ, Красное (Артемовский рудный узел, Бодайбинский район) // Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Миасс, 2015. 25 с. [*Palenova E.E.* Mineralogy of gold deposits Kopylovskoe, Caucasus, Krasnoe (Artyomovsk ore cluster, Bodaibo district) // Avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk. Miass, 2015. 25 p. (in Russian)].
- Петрищев М.С., Петрова А.А., Копытенко Ю.А.* Глубинное строение термальных зон по результатам комплексирования геофизических полей // 38-ая сессия международного научного семинара «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей» им. Д.Г. Успенского. Пермь: ГИ УрО РАН. 2014. С. 24–29 [*Petrishchev M.S., Petrova A.A., Kopytenko Yu.A.* The deep structure of thermal zones according to the results of integration of geophysical fields // 38-aya sessiya mejdunarodnogo nauchnogo seminar «Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretatsii geofizicheskikh poley» im. D.G. Uspenskogo. Perm: GI UrO RAN. 2014. P. 24–29 (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.* 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., Колесова В.И.* Проявление структур литосферы в спектральных характеристиках геофизических полей. Структура земной коры континентов и океанов. Труды ЛОЕ. Т. 77. Вып. 2. 1983. С. 52–59 [*Petrova A.A., Kolesova V.I.* The manifestation of the structures of the lithosphere in the spectral characteristics of geophysical fields. The structure of the earth's crust of the continents and oceans. Trudy LOE. V. 77. Iss. 2. 1983. P. 52–59 (in Russian)].
- Петрова А.А., Колесова В.И.* А.с. № 1289232. Способ геофизической разведки. 1986 [*Petrova A.A., Kolesova V.I.* А.с. № 1289232. Method of geophysical prospecting. 1986 (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., Mavrichiev V.G.* Geomagnetic method of prediction of primary diamond deposits on the example of Krasnovishersky district // Effektivnost prognozirovaniya i poiskov mestorojdeniy 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)].
- Сафонов Ю.Г.* Рудогенерирующие флюидно-магматические системы рудных гигантов благородных и цветных металлов в провинциях — областях проявления плюмового магматизма // Крупные изверженные провинции, мантийные плюмы и металлогения в истории Земли (Материалы конференции). Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. 2015. С. 637–642 [*Safonov Yu.G.* Ore-generating fluid-magmatic systems of ore giants of noble and non-ferrous metals in the provinces — areas of plume magmatism // Krupnyie izverjennyye provintsii, mantiynyye plyumyi i metallogeniya v istorii Zemli (Materialy konferentsii). Irkutsk: Izd-vo Instituta geografii im. V.B. Sochavyi SO RAN. 2015. P. 637–642 (in Russian)].
- Соколов С.К.* Рифовые и шельфовые комплексы протерозойского бодайбинского прогиба и закономерности размещения золотого оруденения // Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. М., 2006. 25 с. [*Sokolov S.K.* Reef and shelf complexes of the Proterozoic Bodaibo deflection and patterns of the placement of gold mineralization // Avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk. M., 2006. 25 p. (in Russian)].
- Хомич В.Г., Борискина Н.Г.* Особенности размещения платинометалльной минерализации на юго-востоке России // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 7. С. 1065–1080 [*Khomich V.G., Boriskina N.G.* Localization of PGE mineralization in southeastern Russia // Russian Geology and Geophysics. 2014. Iss. 7. P. V. 55. P. 842–853. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2014.06.004>].
- 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 [*Erinchev 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)].
- Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В. и др.* Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb- изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов // Геология рудных месторождений. 2011. Т. 53.

- № 1. С. 32–64. [Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V. *et al.* Relationship between metamorphism and ore formation at the Sukhoi Log gold deposit hosted in black slates from the data of U-Th-Pb isotopic SHRIMP-dating of accessory minerals // *Geology of Ore Deposits*. 2011. V. 53. Iss. 1. P. 27–57. <http://dx.doi.org/10.1134/S1075701511010077>].
- Litvinova T., Petrova A. Heterogeneous structure of the lithosphere of the Taimyr Peninsula // Session EMRP2.3/ERE6.7 Advancements in magnetic anomaly studies and natural resources exploration / EGU General Assembly 2016. Vienna, Austria. EGU2016-12688. 2016EGUGA.1812688L.
- 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.
- 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.
- 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. P. 239–247. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_28.

FLUID SYSTEMS OF THE MAMSKO-BODAIBIN MINERAGENIC ZONE IN NORTH TRANSBAIKAL

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, St. Petersburg 199034, Russia;
e-mail: office@izmiran.spb.ru*

The article presents the results of the study of fluid systems in the Earth's crust within the Mamsko-Bodaibin mineragenic zone of the northern Transbaikal using magnetic field anomalies, gravity and seismic data. Two-dimensional models of the density and magnetization of schistosity zones and deep sections of gold deposits allowed us to identify the location of fluid systems and possible paths of magmatic thermofluid flows in ancient rocks. The authors have revealed peculiarities of fluid systems at different depth levels and the role of vertical ore-controlling formations of the earth crust of the Mamsko-Bodaibin zone. Diagnostic features are proposed to control the paths of fluid transport to the surface and the location of the ore-generating structures, taking into account the fluid-magmatic activity of the earth's crust and mantle. The analysis showed that the Mamsko-Bodaibin zone is prospective in the search for new ore objects. Based on the results of the study, we propose a refined model of the ore localization of the Sukholozhskoye ore field, which includes the influence of deep factors.

Keywords: fluid systems, magnetic anomalies, gold deposits.