

ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ СУХОЛОЖСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

А.В.Тарасов,

Г.В.Гурин

ООО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика»,
г. Санкт-Петербург

Представлены неопубликованные материалы крупномасштабных геофизических исследований в районе крупнейшего золоторудного месторождения России Сухой Лог. Месторождение длительное время изучалось различными геологическими и геофизическими методами. Большая часть результатов геологических исследований опубликована, а данные геофизических исследований остались в производственных отчётах. Показано, что в геофизических полях проявлены важные особенности геологического строения Сухоложского рудного поля. Анализ геологических и геофизических материалов позволил выделить ряд геолого-геофизических прогнозно-поисковых признаков Сухоложского рудного поля, которые являются общими – сквозными признаками большеобъёмных золоторудных месторождений в черносланцевых комплексах.

Ключевые слова: Сухоложское рудное поле, Кропоткинский рудный узел, прогнозно-поисковые признаки, поле силы тяжести, аномальное магнитное поле, естественное электрическое поле, электроразведка АМТЗ, электротомография ВП.

В 2013–2015 гг. силами ФГУП ЦНИГРИ и подрядных организаций, включая ЗАО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика», проводились поисковые работы для выявления большеобъёмного золотого оруденения в углеродисто-терригенных комплексах в пределах Енисейской, Байкало-Патомской и Верхояно-Колымской золоторудных провинций (Госконтракт ЕК-04-34/09 от 3 июня 2013 г.). Основная цель работ – обоснование и локализация перспективных площадей в ранге рудных районов – рудных полей. Кроме того, необходимо было разработать технологию прогноза, поисков и оценки большеобъёмных золоторудных месторождений, создать обобщённую прогнозно-поисковую модель большеобъёмного золоторудного объекта в ранге рудного поля. Для этого были созданы цифровые геофизические основы прогнозирования,

включающие в основном крупномасштабные (1:25 000 000–1:50 000) геофизические материалы: карты наблюдаемых геофизических полей и их трансформаций, интерпретационные схемы и разрезы, а также цифровые базы данных. В пределах каждой поисковой площади закладывалась серия опорных геолого-геофизических профилей, на которых осуществлялись комплексные геологические, геохимические, шлихоминералогические и геофизические исследования.

В качестве эталонного рудного поля с большеобъёмной золоторудной минерализацией в Байкало-Патомской провинции рассматривалось Сухоложское рудное поле, включающее месторождения Сухой Лог и Западное. В ходе полевых работ Сухоложское рудное поле было пересечено двумя опорными профилями СЛ-1 и СЛ-2 (рис. 1). Во многом задача профильных ра-



1 – границы литолого-стратиграфических подразделений, их индексы; формации: 2 – сланцево-алевролитно-песчаниковая, 3 – углеродисто-сланцево-алевролитовая, 4 – песчано-алевролитно-сланцевая, 5 – карбонатная, известково-песчано-сланцевая (интенсивность тона уменьшается от древних к молодым); магматический комплекс: 6 – выходы лейкократовых гранитов (Константиновский шток), 7 – дайки гранит-аплитов и гранит-порфиров, 8 – контактовые роговики; структурные элементы: 9 – оси опрокинутых антиклиналей (1 – Сухоложская, 2 – Вернинская, 3 – Атырканская); 10 – тектонические нарушения, выделенные по геологическим данным (а – достоверные и б – предполагаемые надвиги, в – рядовые разрывы, г – зоны повышенной трещиноватости, малоамплитудных нарушений); 11 – коренная золотоносность (а – крупные и б – средние месторождения, в – рудопроявления, г – пункты минерализации); 12 – рудные поля; 13 – контуры месторождений; 14 – промышленные россыпи золота; 15 – опорные геолого-геофизические профили, их номера

бот заключалась в тестировании современного поискового комплекса геолого-геофизических методов на известном и хорошо изученном месторождении, а также в обосновании наиболее эффективного и рационального комплекса поисковых методов.

Краткая геологическая характеристика месторождения Сухой Лог. Месторождение Сухой Лог – один из крупнейших золоторудных объектов России и мира [3, 4], в котором, по последним оценкам [8, 12], сосредоточено >2000 т золота. Размещается на северо-востоке Иркутской области в старейшем Ленском золотоносном районе с богатыми россыпями, а также рядом крупных золоторудных месторождений – Вернинское, Невское, Голец Высочайший и др. При этом Сухой Лог, Вернинское и Невское располагаются в непосредственной близости друг от друга (на расстоянии 5–10 км) на площади Кропоткинского рудного узла.

Месторождение приурочено к терригенно-карбонатно-углеродистому комплексу поздне-рифей-вендского возраста (см. рис. 1). В пределах Кропоткинского рудного узла породы подверглись региональному метаморфизму в зеленосланцевой фации. Верхнерифей-вендские породы узла смяты в почти изоклинальные опрокинутые на юг складки. Тектонические нарушения представлены серией вязкопластических надвигов, сместители которых довольно полого (от 30 до 80°) погружаются на север. Кроме того, большинство исследователей выделяют секущие меридиональные, северо-западные и северо-восточные скрытые разломы, которые связываются с постколлизийным этапом развития региона. По мнению А.И.Иванова [6, 9, 10], именно эти разломы во многом определяют тектонический контроль золотого оруденения за счёт формирования изгибов шарниров антиклинальных складок.

В региональном тектоническом плане Кропоткинский рудный узел расположен в северном крыле Маракано-Тунгусской мегасинклинали. Месторождение Сухой Лог и одноимённое рудное поле приурочены к ядру сжатой опрокинутой асимметричной Сухоложской антиклинали субширотного простирания (азимут 275–295°). Ядро складки сложено умеренно углеродистыми породами хомолхинской свиты верхнего рифея (R_3hm), представленной переслаиванием углеродистых филлитовидных и алевритистых

сланцев с подчинённым количеством маломощных горизонтов серицит-кварцевых песчаников. Крылья складки сложены карбонатно-терригенными породами имнянской свиты (R_3im) – известково-слюдистыми алевритистыми сланцами с прослоями песчаных известняков. Шарнир складки полого погружается на запад под углами 2–9°, а её осевая плоскость – на северо-северо-восток под углами 25–35°. Висячее крыло имеет выдержанное на всём протяжении складки падение (15–17°), на восточном фланге месторождения оно выполаживается до 5–10°, что приводит к расширению складки со стороны висячего борта. Падение подвёрнутого крыла более крутое (30–35°) в западной части рудного поля и менее (45–50°) на его восточном фланге. Размах крыльев антиклинали на уровне шарнира средней подсвиты хомолхинской свиты в западной и центральной частях поля достаточно выдержан (400–450 м) и резко увеличивается к востоку (520–725 м и более).

Магматические образования Кропоткинского рудного узла представлены небольшим по размеру (~0,5 км²) Константиновским штоком, выходящим на поверхность в 7 км к юго-западу от месторождения. Судя по гравиметрическим данным, шток является апикальной частью более крупного Угаханского гранитного массива, кровля которого погружается в северном направлении и, возможно, на глубине приближается к месторождению Сухой Лог на расстояние до 4 км. Константиновский шток и окружающие его многочисленные дайки гранит-порфиров относятся к мамакано-конкудерскому магматическому комплексу палеозойского возраста (329±9 млн лет) [18].

Метасоматоз широко проявлен в пределах Бодайбинского рудно-россыпного района и, в частности, на площади Кропоткинского рудного узла. Генетически он связан с рудным процессом и, вероятно, предшествовал и сопровождал рудоотложение. Расположение метасоматических зон контролируется тектоническими нарушениями и сопряжёнными с ними зонами рассланцевания и кливажа, тяготеющими к осям антиклинальных складок [10, 11]. Из метасоматических проявлений наиболее широко развита карбонатизация, представленная вкрапленностью, гнёздами, линзами и прожилками железисто-магнезиальных карбонатов (сидерита, анкерита, марганесидерита). При окислении кар-

бонаты приобретают отчётливый охристый цвет за счёт образования лимонита, поэтому в геологоразведочной практике получили название «бурых шпатов», а зоны карбонатизации – «зоны бурошпатизации». Вкрапленники железисто-магнезиальных карбонатов имеют вид порфиробластических выделений линзовидной и ромбоидальной форм. Обычно длинные оси порфиробластов ориентированы вдоль кливажа. Объёмное содержание железисто-магнезиальных карбонатов в «зонах бурошпатизации» варьирует от 5 до 30–40% (иногда достигает 60%). «Бурошпатизация» протекала одновременно с серицитизацией и хлоритизацией и в той или иной степени прослежена на всех месторождениях и рудопрооявлениях Кропоткинского рудного узла. Процесс формирования «бурошпатизации» рассматривается в качестве важнейшего рудоподготовительного этапа [10].

К важным метасоматическим изменениям относится сульфидизация пород. Для Сухоложского рудного поля выделяют несколько последовательных стадий сульфидизации. При этом изначально изменённые углеродисто-терригенные породы содержали значительное количество пирита, образовавшегося ещё на этапе седиментации [1, 3, 10].

Ранний вид наложенной сульфидизации – пирротинизация, которая, как и «бурошпатизация», в основном проявлена вдоль тектонических зон. Пирротин, скорее всего, возник в ходе преобразования сингенетического пирита на завершающем этапе складкообразования в результате динамометаморфизма. Зоны пирротинизации в аномальном магнитном поле отражены в виде полосовых отрицательных аномалий. Как правило, пирротин не содержит повышенных концентраций золота, хотя на ряде месторождений и рудопрооявлений Бодайбинского района входит в состав золоторудной минерализации. Поздняя сульфидизация представлена пиритом, арсенопиритом, в меньшей степени другими сульфидами (халькопиритом, галенитом, сфалеритом).

Рудная минерализация представлена кварц-пирит-золото-карбонатной ассоциацией с незначительной примесью других сульфидов [3, 8, 23]. Пирит – основной минерал-концентратор золота. Наложённая пиритовая минерализация чаще распространена в углеродистых сланцах, слагающих основной объём месторождения.

Распределение и морфология золоторудной минерализации имеют ярко выраженный структурный и литологический контроль. Структурно-литологическими факторами определяются также состав и интенсивность околорудных метасоматических изменений («бурошпатизация», серицитизация, сульфидизация) вмещающих умеренно углеродистых сланцев и алевролитов хомолхинской свиты верхней подсвиты (R_3hm_3), в меньшей степени низов имнянской свиты (R_3im_1).

На месторождении Сухой Лог золотоносна прожилково-вкрапленная сульфидная пиритовая минерализация характерной морфологии, которая досконально изучена [3, 24]. Выделяют до шести морфологических типов пирита. Два из них представлены тонкой, пылевидной равномерно распределённой вкрапленностью наиболее раннего сингенетического пирита с относительно низким содержанием золота и равномерным распределением элементов-индикаторов.

Золотом наиболее богат гнездово-вкрапленный тип пиритовой минерализации, представленный крупными (3–5 см) сростками кристаллов пирита неправильной формы. Крупные сростки кристаллов развиты на участках интенсивного слоевого и главного кливажа. Линзовидные выделения кристаллов пирита ориентированы параллельно плоскости кливажа. Для них характерно образование каймы, состоящей из кварца и железисто-магнезиальных карбонатов. Кроме того, развиты пиритовые прожилки в тесной ассоциации с кварцем и карбонатами. Различают три морфологических типа прожилков: прямолинейные длиной от 0,5 до 3 м, контролируемые трещинами межслоевого и осевого кливажа, а также сколовыми; складчатые, связанные с межслоевым кливажем в зоне интенсивного смятия; сложной формы, приуроченные к трещинам отрыва.

Интенсивность пиритизации и соотношение различных морфологических типов пиритовой минерализации определяются структурно-литологическими условиями их локализации. Приосевая часть Сухоложской антиклинали наиболее насыщена (содержание пирита 1,5–4%) кварц-пиритовыми образованиями. При этом интенсивно пиритизированы сложно дислоцированные в результате пластического течения углеродистые филлитовидные сланцы хомолхинской свиты.

Многочисленные кварцевые и кварц-карбонатные жилы преимущественно распространены в приповерхностной части рудного поля и в основном в центральной части. Жилы, как правило, плитообразной и линзовидной форм залегают преимущественно согласно с плоскостями осевого кливажа. Протяжённость жил от десятков до сотен метров, мощность от нескольких десятков сантиметров до первых метров. Из-за крайне неравномерного распределения золота в жилах они не имеют самостоятельного промышленного значения.

Промышленная золоторудная минерализация выделена по бортовому содержанию Au 0,2 г/т и отвечает рангу минерализованной зоны [8]. Последняя охватывает практически всю толщу пород хомолхинской свиты в замковой части и крыльях антиклинали, а также частично основание имняхской свиты в висячем и подвёрнутом крыльях, при этом почти точно наследует и подчёркивает структуру запрокинутой антиклинальной складки.

Геологическая граница Сухоложского рудного поля в первом приближении совпадает с западным замыканием Сухоложской антиклинали и контактом между хомолхинской и имняхской свитами. Южная граница поля соответствует положению шовной части Кадали-Сухоложской взбросо-надвиговой зоны. Восточная граница определена условно по намечающейся фациальной изменчивости пород хомолхинской свиты, увеличению объёма грубозернистых разностей в её составе и затуханию оруденения в восточном направлении [8]. Протяжённость рудного поля по простиранию ~10–12 км при ширине от 3,2 км на западе до 4,5 км в центральной части.

Значительные размеры и относительно простое геологическое строение месторождения делают его «идеальным» эталонным объектом для тестирования различных геолого-геохимических и геофизических методов поиска.

Геофизическая изученность. В 1970-х годах месторождение Сухой Лог и территория Кропоткинского рудно-россыпного узла изучались аэрогеофизическими и наземными геофизическими методами, включавшими магниторазведку, аэрогаммаспектрометрию (АГС), гравиразведку, электроразведку методами естественного поля (ЕП), кажущегося сопротивления (КС) (Л.С.Ростова, 1977 г.; А.Р.Кулаков, 1976 г.; С.Ф.Зубарев, 1978 г.; Л.А.Верняев, 1988 г.).

Основной объём работ выполнен в м-бе 1:50 000. Площадь, прилегающая к Сухоложскому рудному полю, исследовалась в м-бе 1:25 000–1:10 000 (С.Ф.Зубарев, 1978 г.). На месторождении Сухой Лог проведён значительный объём вертикальных электрических зондирований методом вызванной поляризации (ВЭЗ-ВП) в комплексе со скважинной геофизикой (каротаж магнитной восприимчивости, вызванной поляризации (ВП), ЕП, дополненные массовым измерением петрофизических свойств образцов керна (С.Ф.Зубарев, 1978 г.)). С 1980-х годов геофизические работы на месторождении не проводились.

В 2013–2015 гг. ФГУП ЦНИГРИ проведены комплексные геолого-геофизические полевые наблюдения по двум опорным профилям (СЛ-1 и СЛ-2, см. рис. 1) общей длиной 50 км, которые пересекли Сухоложское рудное поле вкрест простирания рудоконтролирующих структур. На опорных профилях при геофизических наблюдениях использовались следующие методы: наземная магнитная съёмка с шагом 5 м, электроразведка ЕП (потенциал-установкой, шаг 20 м), аудиоманнитотеллурические зондирования (АМТЗ, шаг 200–100 м), электротомография ВП (непосредственно на месторождении) и гравиразведка (шаг 100 м со сгущением до 40–20 м в районе месторождения). Кроме того, в полосе профилей силами ООО ГП «СИБИРЬГЕОФИЗИКА» выполнена высокоточная аэрогеофизическая съёмка (магниторазведка и гамма-спектрометрия) м-ба 1:25 000.

Методика сбора и анализа геолого-геофизических материалов. Для создания геофизической основы прогнозирования из ФГБУ «Российский Федеральный Геологический Фонд» получены аналоговые картографические геологические и геофизические материалы: сканированные карты изолиний, графиков, фактического материала и проч. Ключевые геофизические материалы (карты наблюждённых геофизических полей) были оцифрованы. Аэромагнитное поле, содержание естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) – К, U, Th, радиоактивность (мощность экспозиционной дозы гамма-излучения (МЭД)), потенциал естественного электрического поля (U_{en}) оцифровывались с карт изолиний, а поле кажущегося удельного электрического сопротивления с карт графиков. Поле силы тяжести оцифровано с карт фактического мате-

риала, содержащих пункты гравиметрических наблюдений со значениями поля силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя $2,75 \text{ г/см}^3$.

Сводные матрицы геофизических полей созданы с применением отработанной и апробированной технологии составления геофизической основы (ГФО) для ГДП-200 [16]. Технология позволяет получить бесшовные цифровые геофизические матрицы из разномасштабных и разновременных геофизических материалов.

Результаты современной аэрогеофизической съёмки 2013 г. также использованы при составлении сводных матриц аномального магнитного поля (ΔT)_a и содержаний ЕРЭ. На основе созданных цифровых матриц геофизических полей рассчитаны их трансформанты: локальные и региональные составляющие полей, градиенты, различные классификации и др. Все собранные цифровые материалы были организованы в виде базы данных, управление и анализ которой осуществлялись с помощью геоинформационной системы ArcMap. Кроме того, собраны и обобщены материалы многочисленных петрофизических исследований (А.Р.Кулаков, 1976, 1983 гг.; С.Ф.Зубарев, 1978 г.; Э.В.Лешкевич, 1979 г.) в целом для Бодайбинского золотоносного района и непосредственно для месторождения Сухой Лог.

Затем совместно анализировались геофизические поля, их трансформации и геологическая структурно-формационная основа, созданная специалистами ФГУП ЦНИГРИ по результатам обобщения материалов крупномасштабных геологосъёмочных и поисковых работ. Выявлены характерные геофизические «образы» элементов геологического строения территории: литолого-стратиграфические комплексы, тектонические нарушения, складчатые структуры, магматические комплексы, зоны метасоматических изменений. Благодаря анализу структуры геофизических полей при различных уровнях сглаживания уточнены и ранжированы тектонические нарушения: глубинные разломы, надвиги, продольные зоны расланцевания, секущие зоны трещиноватости. В итоге установлены условно «нормальные» и «аномальные» сочетания геологических элементов строения и геофизических признаков. Также было выяснено, что отклонение геофизических признаков от условно «нормального» сочетания, как правило, соответ-

ствует зонам наложенных гидротермально-метасоматических изменений.

Результаты профильных наблюдений анализировались путём построения петрофизических разрезов (плотности, намагниченности, удельного электрического сопротивления) на основе решения соответствующих обратных задач с помощью современных программ (GRAV3D, MAG3D, ZONDRES2D). В итоге составлены сводные интерпретационные геолого-геофизические разрезы. Результаты анализа геофизических полей с элементами интерпретации приведены на рисунках 2–8. Ниже описаны выявленные геолого-геофизические признаки Сухоложского рудного поля для каждого геофизического поля.

Поле силы тяжести. В поле силы тяжести (рис. 2) Сухоложское рудное поле приурочено к северному краю Витимского регионального максимума, который пространственно совпадает с наиболее глубокой частью Бодайбинского синклинального погружения. Геологическая природа Витимского гравитационного максимума объясняется двояко: с одной стороны, подъёмом границы Мохо с 45–47 до 41–44 км [15, 23], связанным с палеорифтовой структурой, с другой – повышенной плотностью ($2,74 \text{ г/см}^3$, по данным А.Р.Кулакова и С.Ф.Зубарева) рифей-вендских пород, залегающих на относительно лёгком архей-раннепротерозойском фундаменте гранито-гнейсового состава со средней плотностью $2,69 \text{ г/см}^3$. При этом мощность рифей-вендского складчатого чехла в южной части синклинория может достигать 12 км. В этом случае региональная составляющая поля силы тяжести почти зеркально отражает морфологию кровли фундамента, а наблюдаемое постепенное снижение интенсивности аномалии в северной части Бодайбинского синклинория связывается с подъёмом кровли фундамента. Если принять данную модель строения синклинория, то предполагаемая глубина до кровли фундамента в районе месторождения Сухой Лог составляет около 5–6 км.

По современным представлениям о тектоническом строении Байкало-Патомской складчатой области фундамент Бодайбинского синклинального погружения вовлечён в складкообразование и разбит серией субширотных разломов, зажатых между крупными региональными разломами северо-северо-восточного простирания, – Абдачским на западе и Жу-

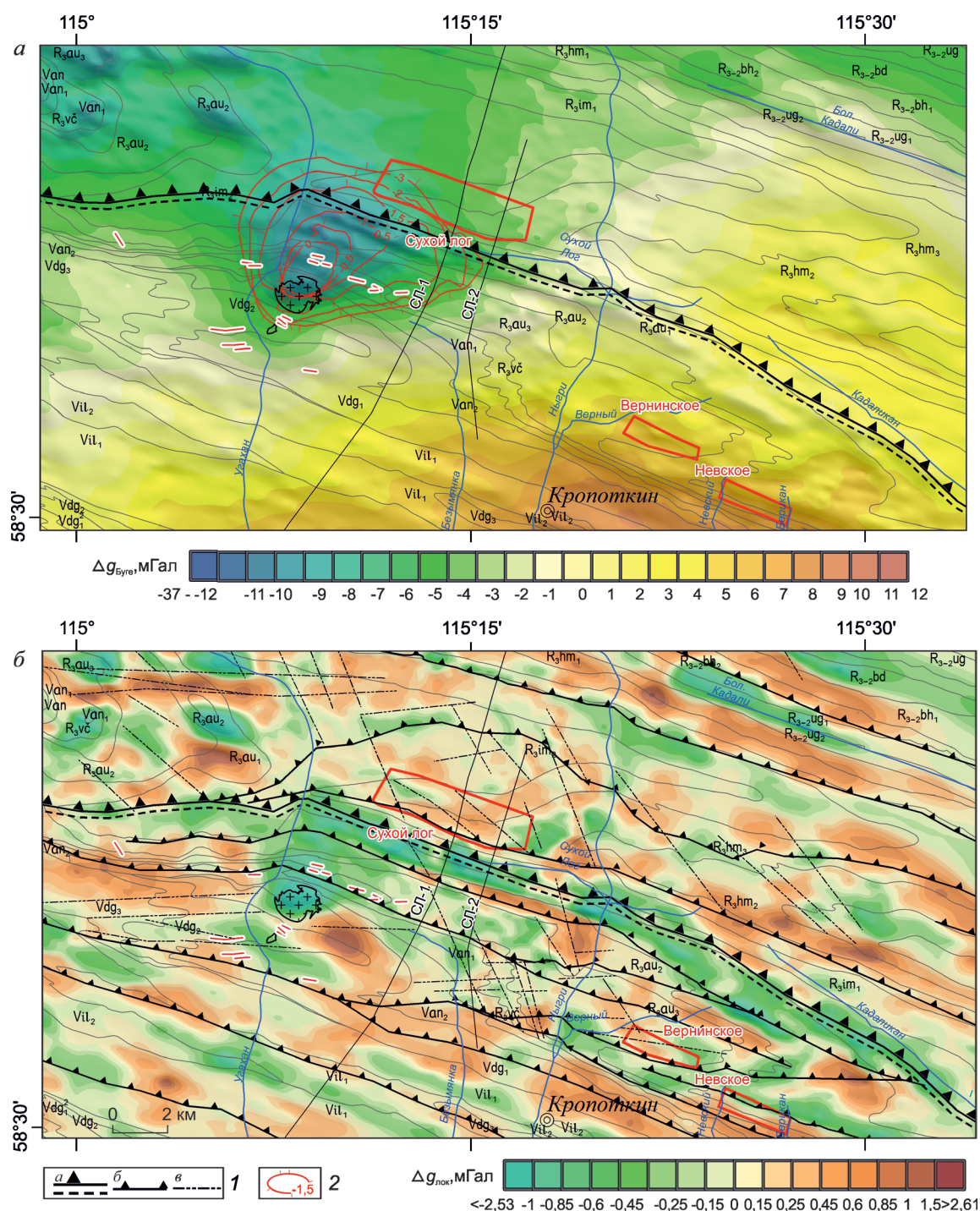


Рис. 2. Поле силы тяжести в пределах Кропоткинского рудного узла. Аномальное поле силы тяжести в редукции Буге (уровень условный, с плотностью промежуточного слоя 2,75 г/см³) (а) и локальная составляющая поля силы тяжести, полученная вычитанием из $\Delta g_{\text{Буге}}$ поля, осреднённого в окне диаметром 4 км (б):

1 – тектонические нарушения, выделенные по геолого-геофизическим данным (*а* – Кадали-Сухоложский надвиг, *б* – рядовые надвиги, зоны расщепления, *в* – предполагаемые секущие зоны складчато-разрывных дислокаций); 2 – изогипсы кровли Угаханского гранитного массива (индексы соответствуют абсолютным высотам в км); остальные усл. обозн. см. рис. 1

инским на востоке [9, 13, 18]. В поле силы тяжести субширотные разломы выражены в виде гравитационных ступеней, отвечающих границам блоков фундамента с различной плотностью и глубиной до их кровли.

В районе Сухоложского рудного поля выделяется гравитационная ступень амплитудой 10 мГал, осложнённая глубоким изометрическим Угаханским минимумом к западу от месторождения и Кропоткинским максимумом к юго-востоку (южнее Вернинско-Невского рудного поля). Большинство исследователей [9, 23] объясняют гравитационную ступень уступом в дорифейском фундаменте. При этом северный блок приподнят относительно южного на 2 км. Уступ фундамента контролирует многочисленные надвиговые нарушения и продольные постскладчатые зоны расщепления в рифей-вендском складчатом чехле, а также размещение магматических образований. Данная достаточно широкая (~5 км) тектоническая зона названа Кадали-Сухоложским глубинным разломом.

Угаханский гравитационный минимум однозначно связан со скрытым гранитным массивом, апикальная часть которого вскрывается в виде Константиновского штока в 7 км к юго-западу от месторождения. Лейкократовые граниты штока имеют значительный дефицит плотности ($-0,13 \text{ г/см}^3$, средняя плотность $2,61 \text{ г/см}^3$) относительно вмещающих их пород (средняя $2,74 \text{ г/см}^3$).

Ещё на этапе первых гравиметрических съёмок в 1970-х годах исследователями (А.Р.Кулаков, 1977 г.; С.Ф.Зубарев, 1978 г. и др.) было выполнено математическое моделирование поля $\Delta g_{\text{Буре}}$ для выяснения морфологии скрытого гранитного массива. Из-за несовершенства вычислительной техники расчёты проводились с различными упрощениями, поэтому модели разных авторов существенно отличались друг от друга. Однако все они сходны в том, что источником интенсивной отрицательной аномалии является относительно крупное гранитное тело. Центр массы тела находится на глубине нескольких километров (~5 км), при этом он смещён к северу на 2–3 км относительно выхода на поверхность Константиновского штока.

Нами также смоделировано поле силы тяжести для уточнения морфологии Угаханского массива. Моделирование выполнено на основе строгих алгоритмов, учитывающих трёхмерность

среды (программа GRAV3D [20]). Принимая во внимание данные петрофизических исследований и оценки плотности пород, диапазон возможного изменения плотности в модели был ограничен в пределах $2,57\text{--}2,9 \text{ г/см}^3$. Это позволило существенно сузить круг возможных решений и, соответственно, повысить геологическую достоверность модели. В результате моделирования построены изолинии глубин до кровли гранитного массива на различных гипсометрических уровнях (см. рис. 2, а). За граничную плотность при определении кровли массива принято значение $2,66 \text{ г/см}^3$. Исходя из этих построений, гранитный массив в первом приближении имеет форму скошенного конуса, вершина которого выходит на поверхность в виде Константиновского штока, осевая линия наклонена на северо-восток под углом около 80° . На гипсометрических уровнях $-1\text{--}2 \text{ км}$ намечается вытягивание массива в восточном направлении. При этом западный фланг месторождения Сухой Лог находится приблизительно в 4 км над кровлей массива.

Локальная составляющая поля силы тяжести ($\Delta g_{\text{лок}}$), полученная путём вычитания осреднённого поля $\Delta g_{\text{Буре}}$ в круглом окне диаметром 4 км из наблюждённого поля, в большей степени отражает особенности тектонического строения верхней части рифей-вендского складчатого чехла (см. рис. 2, б). В поле $\Delta g_{\text{лок}}$ отчётливо проявлена линейная отрицательная аномалия (интенсивностью до -3 мГал) северо-западного (субширотного) простирания, приуроченная к подвёрнутому южному крылу Сухоложской антиклинали. По данным гравиметрической съёмки м-бов 1:25 000 и 1:50 000 аномалия, названная Кадали-Сухоложским минимумом, уверенно прослеживается на 30 км от долины р. Угахан (на западе) через долины ручьев Сухой Лог и Кадаликан до долины р. Кадали (на востоке). В долине руч. Сухой Лог Кадали-Сухоложский минимум приобретает форму корытообразного трога, расширяющегося в сторону Угаханского минимума. Интенсивность отрицательной аномалии и её ступенеобразные борта говорят о значительной мощности рыхлых отложений (до 70–100 м), а также, возможно, о развитии линейной коры выветривания над выходом на поверхность осевой зоны надвига.

Математическое моделирование поля $\Delta g_{\text{лок}}$ показало, что Кадали-Сухоложский минимум

только частично обусловлен влиянием низкоплотных ($1,9\text{--}2,3 \text{ г/см}^3$) аллювиально-моренных отложений и коры выветривания в долине руч. Сухой Лог. Полностью минимум такой глубины можно объяснить только введением в плотностную модель наклонной зоны разуплотнения (дефицит плотности $-0,15 \text{ г/см}^3$). Поэтому нами предполагается, что Кадали-Сухоложский гравитационный минимум отмечает именно осевую зону Кадали-Сухоложского надвига. Зону разуплотнения можно связать с интенсивным расланцеванием пород вдоль осевой плоскости надвига. Вероятно также, что контакт между верхней и нижней подсвитами имняхской свиты сорван по надвику. Возможно, что зона расланцевания к юго-западу от Сухоложского рудного поля насыщена дайками гранит-порфиров – сателлитами Угаханского массива. На восточном фланге Кропоткинского рудного узла к Кадали-Сухоложскому гравитационному минимуму тяготеет дайковое поле лампрофиров в долине р. Кадали. Это, в свою очередь, указывает на значительную глубину заложения Кадали-Сухоложской тектонической зоны.

В целом Кадали-Сухоложская надвиговая зона по геофизическому «образу» существенно отличается от других субширотных тектонических зон глубокого заложения, выявленных в пределах центральной части Бодайбинского синклиория. Во-первых, в её пределах отчётливо проявлен магматизм. Во-вторых, плотность в зоне надвига существенно понижена за счёт интенсивного расланцевания. Всё это позволяет рассматривать Кадали-Сухоложский надвиг в качестве основной рудоконтролирующей высокопроницаемой и неоднократно подновляемой тектонической зоны. Соответственно, Кадали-Сухоложский гравитационный минимум можно считать геофизическим прогнозным признаком первого порядка.

Кроме линейных отрицательных аномалий, как правило, соответствующих продольным надвигам и сопряжённым с ними зонам расланцевания, в поле $\Delta g_{\text{лок.}}$ проявлены локальные положительные аномалии $\Delta g_{\text{лок.}}$. Сопоставление структуры поля $\Delta g_{\text{лок.}}$ со структурно-формационной основой (см. рис. 2, б) показывает, что аномалии $\Delta g_{\text{лок.}}$ не имеют отчётливой связи с литологическими комплексами. Некоторые линейные положительные аномалии $\Delta g_{\text{лок.}}$ секут границы литологических комплексов и носят

сквозной характер. В ходе заверочных работ установлено, что часть положительных аномалий $\Delta g_{\text{лок.}}$ пространственно совпадает с «зонами бурошпатизации» пород вдоль тектонических зон.

В конце 1970-х годов (А.Р.Кулаков, 1976 г.; С.Ф.Зубарев, 1978 г.) изучены возможности гравиразведки для выделения наложенной гидротермально-метасоматической минерализации. Выполнены многочисленные петрофизические исследования образцов горных пород (по совокупности >4000), нацеленные на определение зависимости плотности пород от их минерального состава. Установлено, что плотность закономерно возрастает с увеличением содержания серицита, сульфидов и железисто-магнезиальных карбонатов (сидерита, анкерита), имеющих соответственно плотность $2,88, 4,5\text{--}4,9, 3,0\text{--}3,89 \text{ г/см}^3$. В тоже время, она уменьшается с ростом количества кварца (плотность $2,61 \text{ г/см}^3$), которое может достигать 80%. Плотность также существенно снижается при окислении железисто-магнезиальных карбонатов и сульфидов в поверхностных условиях. Часто над зонами интенсивной «бурошпатизации» наблюдается увеличенная мощность коры выветривания, что приводит к нивелированию возможного положительного гравитационного эффекта от метасоматических зон. На основании этого был сделан вывод о том, что однозначно выделять зоны наложенной минерализации по аномалиям $\Delta g_{\text{лок.}}$ того или иного знака нельзя. Тем не менее, в пределах Сухоложского рудного поля выявлена положительная аномалия $\Delta g_{\text{лок.}}$ интенсивностью до $0,3\text{--}0,5 \text{ мГал}$ (см. рис. 2, б). Центр аномалии немного смещён относительно выхода на дневную поверхность рудной зоны на север, по направлению её погружения (рис. 3, а).

Последующие петрофизические исследования (рис. 4, а) образцов керна, отобранных из поисково-разведочных скважин и штолен, показали, что положительный гравитационный эффект обусловлен интенсивными железисто-магнезиальной карбонатизацией и сульфидизацией. Достоверно установлено, что средняя плотность пород в рудной зоне составляет $2,86 \text{ г/см}^3$, а на отдельных участках достигает $2,9\text{--}3,0 \text{ г/см}^3$ (698 обр.) (С.Ф.Зубарев, 1978 г.). На основании этих данных были сделаны попытки оценки рудной массы и ресурсов золота (С.Ф.Зубарев, 1978 г.) по результатам объёмного моделирования поля силы тяжести. Следует отметить, что

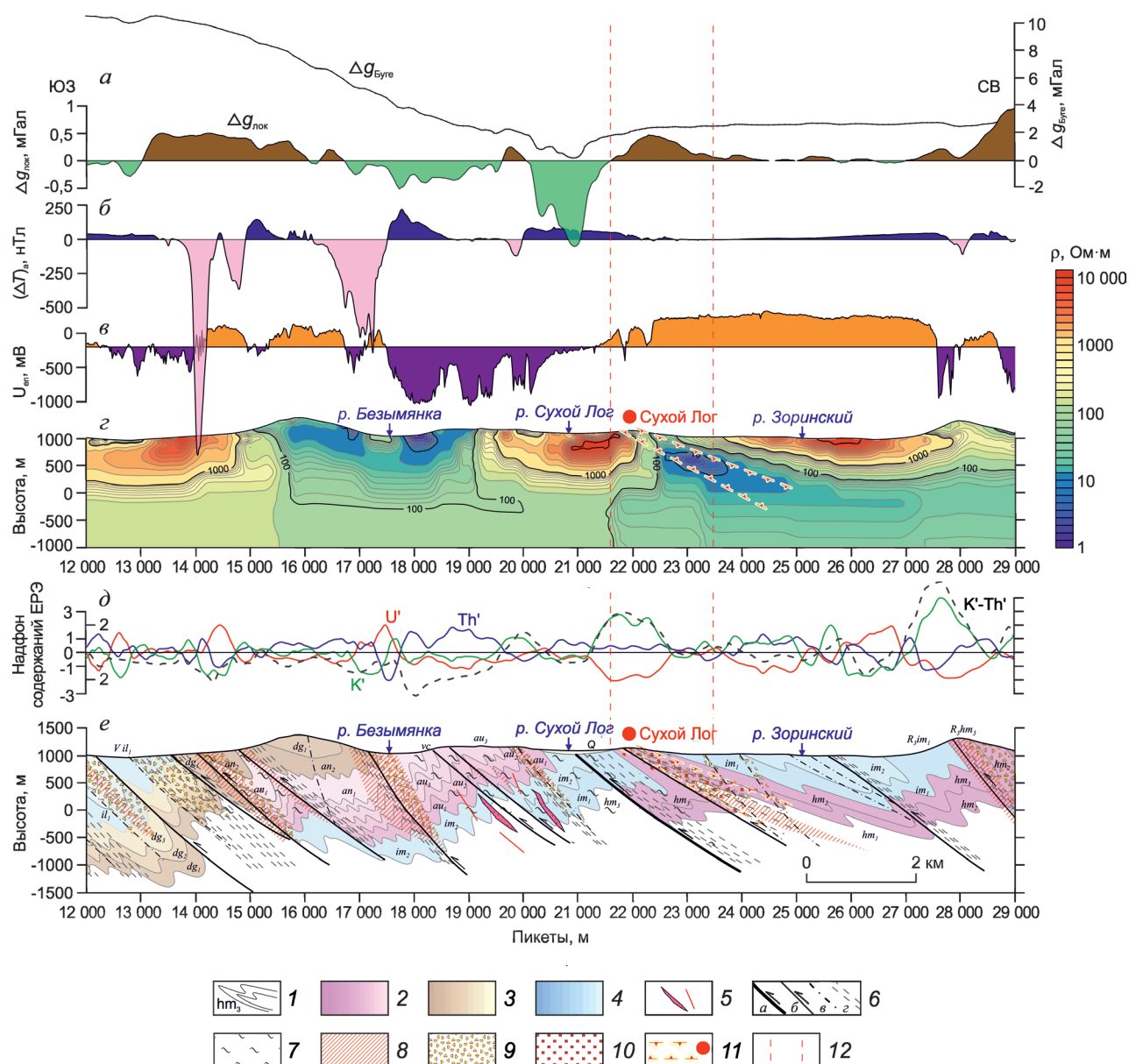


Рис. 3. Результаты геофизических наблюдений по опорному профилю СЛ-1:

a – поле силы тяжести в редукции Буге (плотность промежуточного слоя 2,75 г/см³), локальная составляющая поля силы тяжести (разность поля осреднённого в окне 4 км); *б* – аномальное магнитное поле (наземная съёмка); *в* – потенциал естественного электрического поля; *г* – разрез удельного электрического сопротивления по результатам АМТ-зондирования; *д* – надфоновые содержания ЕРЭ по результатам обработки АГС материалов методом «АРК»; *е* – интерпретационный геолого-геофизический разрез; 1 – границы литолого-стратиграфических подразделений, индексы свит; формации: 2 – углеродисто-сланцево-алевролитовая, 3 – песчано-алевролит-сланцевая, 4 – карбонатная, известковисто-песчано-сланцевая; 5 – дайки гранит-аплитов и гранит-порфиров (сателлиты Угаханского массива); 6 – тектонические нарушения, выделенные по геолого-геофизическим данным (*a* – основные надвижки, *б* – рядовые надвижки, *в* – предполагаемые секущие зоны складчато-разрывных дислокаций, *г* – зоны рассланцевания); 7 – зоны интенсивного тектонического смятия; 8 – зоны пирротинизации; 9 – зоны интенсивной железо-магнезиальной карбонатизации; 10 – кварц-пиритовая прожилково-вкрапленная минерализация в осевой зоне Сухоложской антиклинали; 11 – минерализованная зона месторождения Сухой Лог; 12 – границы рудного поля

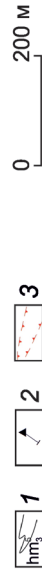
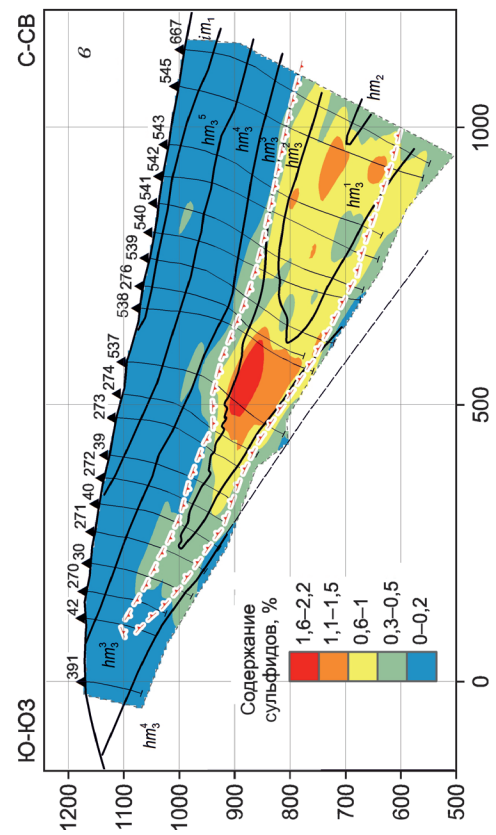
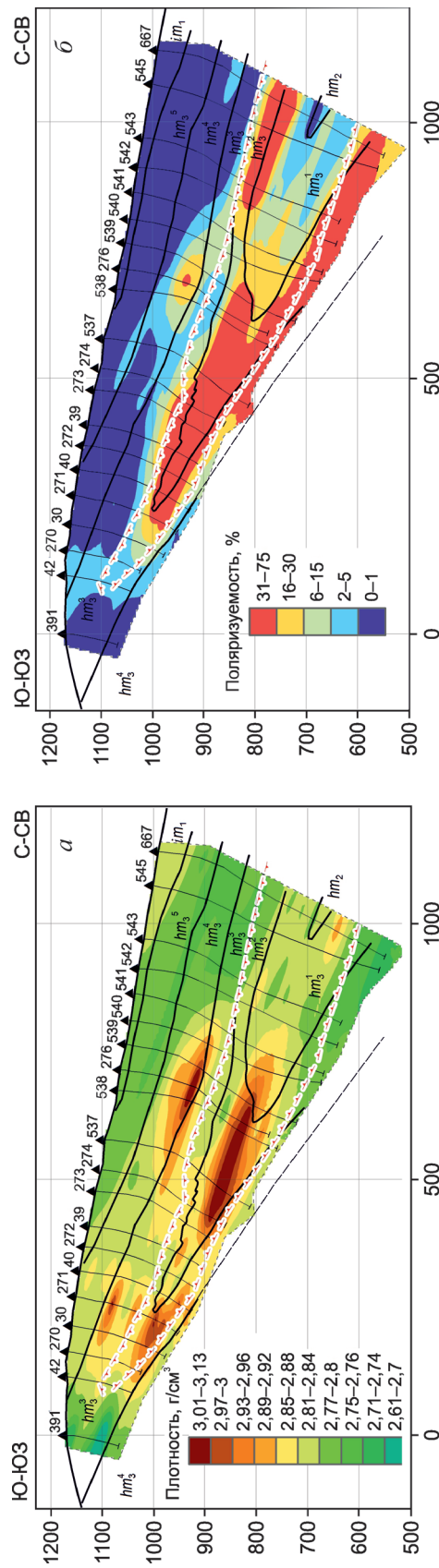


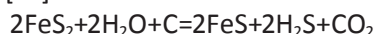
Рис. 4. Результаты изучения физических свойств пород по буровой линии БЛ+17 (по материалам С.Ф.Зубарева, 1978 г.):

а – разрезы плотности, б – поляризуемости, в – содержание сульфидов в кернах; 1 – граница литологических пачек; 2 – поисково-разведочные скважины, их номера (по состоянию на 1977 г.); 3 – контур рудной зоны, выделенный по бортовому содержанию Au 1 г/т (по данным опробования 1977 г.)

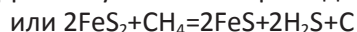
ожидаемый гравитационный эффект от «утяжелённой» рудной зоны с известной геометрией рудной залежи должен быть ~0,8 мГал (при средней избыточной плотности пород 0,11 г/см³). Однако интенсивность наблюдаемой аномалии снижена до 0,3–0,5 мГал за счёт компенсационного влияния осевой зоны Кадали-Сухоложского надвига (с дефицитом плотности 0,11–0,13 г/см³). Таким образом, положительная аномалия $\Delta g_{\text{лок.}}$ может рассматриваться в качестве признака минерализованной зоны.

Аномальное магнитное поле. Структура аномального магнитного поля (ΔT)_а в районе рудного поля имеет типичный для Бодайбинского синклиория линейно-полосовой характер (рис. 5, а). В структуре поля (ΔT)_а доминируют линейные отрицательные аномалии, занимающие согласное с простираем основных складчатых структур положение. Многочисленными заверочными работами установлено, что источниками отрицательных аномалий служат зоны пирротинизации. Пирротинизация преимущественно развита по зонам рассланцевания, сопровождающих надвиговые деформации. Образование пирротина в этих зонах, скорее всего, происходило по первичному осадочно-диагенетическому пириту, который довольно широко распространён в углеродистых алевросланцевых толщах. При этом углеродистое вещество являлось эффективным реагентом, значительно понижающим температуру пирит-пирротинового перехода [22].

В системе пирит–вода–углерод преобразование пирита в пирротин протекает по реакциям [22]:



пирит+водный флюид+углеродистое вещество=пирротин+углекислый флюид



пирит+углеводородный флюид=пирротин+графит.

Первая реакция может протекать уже на заключительных этапах диагенеза – на низкотемпературных ступенях (130–180°C) зеленосланцевой фации метаморфизма. Для второй реакции необходимы более высокие температуры, характерные для эпидот-амфиболитовой фации.

По данным палеомагнитного и структурного анализов (С.Ф.Зубарев, 1978 г.) зоны пирротинизации сформировались после основного этапа складкообразования по тектоническим зонам. Приведённые выше реакции эффективно про-

текают только при условии удаления продуктов реакции из системы. Поэтому пирротинизация наиболее интенсивна именно в проницаемых тектонических зонах. При анализе данных аэромагнитных съёмок в пределах Бодайбинского района ещё в конце 1970-х годов отмечалось, что в свитах рифея и венда существенно карбонатного состава (илигирская, имняхская, угаханская) интенсивность сквозных линейных аномалий резко снижается или полностью затухает. Это обусловлено тем, что в карбонатных породах содержится меньше углеродистого вещества и значительно меньше пирита (в целом железа). По этой же причине наиболее интенсивные магнитные аномалии тяготеют к углеродистым свитам с повышенным содержанием углеродистого вещества и железа (бужуйтинская, хомолхинская, аунакитская свиты).

Пирротин – относительно пластичный минерал в отличие от пирита. Он легко перекристаллизовывается при тектонических деформациях, а главные кристаллографические оси переориентируются перпендикулярно главной оси сжатия [7, 19]. Новообразованные кристаллические агрегаты пирротина, как правило, распределены по плоскостям кливажа и сланцеватости. При этом ориентировка главной оси намагничивания пирротина соответствует главной кристаллографической оси [19]. Пирротин спонтанно намагничивается в существующем на момент его образования магнитном поле Земли. После этого его намагниченность становится устойчивой (существенно остаточной) и почти не изменяется в течение длительного времени. Остаточная намагниченность (J_n) пирротинизированных пород значительно превосходит индуцированную (J_i), которая зависит от магнитной восприимчивости (χ). Для большинства литологических разностей рифей-вендских пород χ находится в диапазоне $(10\text{--}50) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, а для пирротинизированных достигает $(100\text{--}250) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. По данным предшественников, значения фактора Кенигсбергера ($Q_n = J_n/J_i$) для пирротинизированных пород изменяются от 5 до 200 (А.Р.Кулаков, 1977 г.; С.Ф.Зубарев, 1978 г.; Э.В.Лешкевич, 1979 г.). По данным лабораторных исследований образцов горных пород, отобранных из зон пирротинизации в 2013–2014 гг., и математического моделирования аномалий (ΔT)_а абсолютная остаточная намагниченность пирротинизированных пород составляет 1–10 А/м.

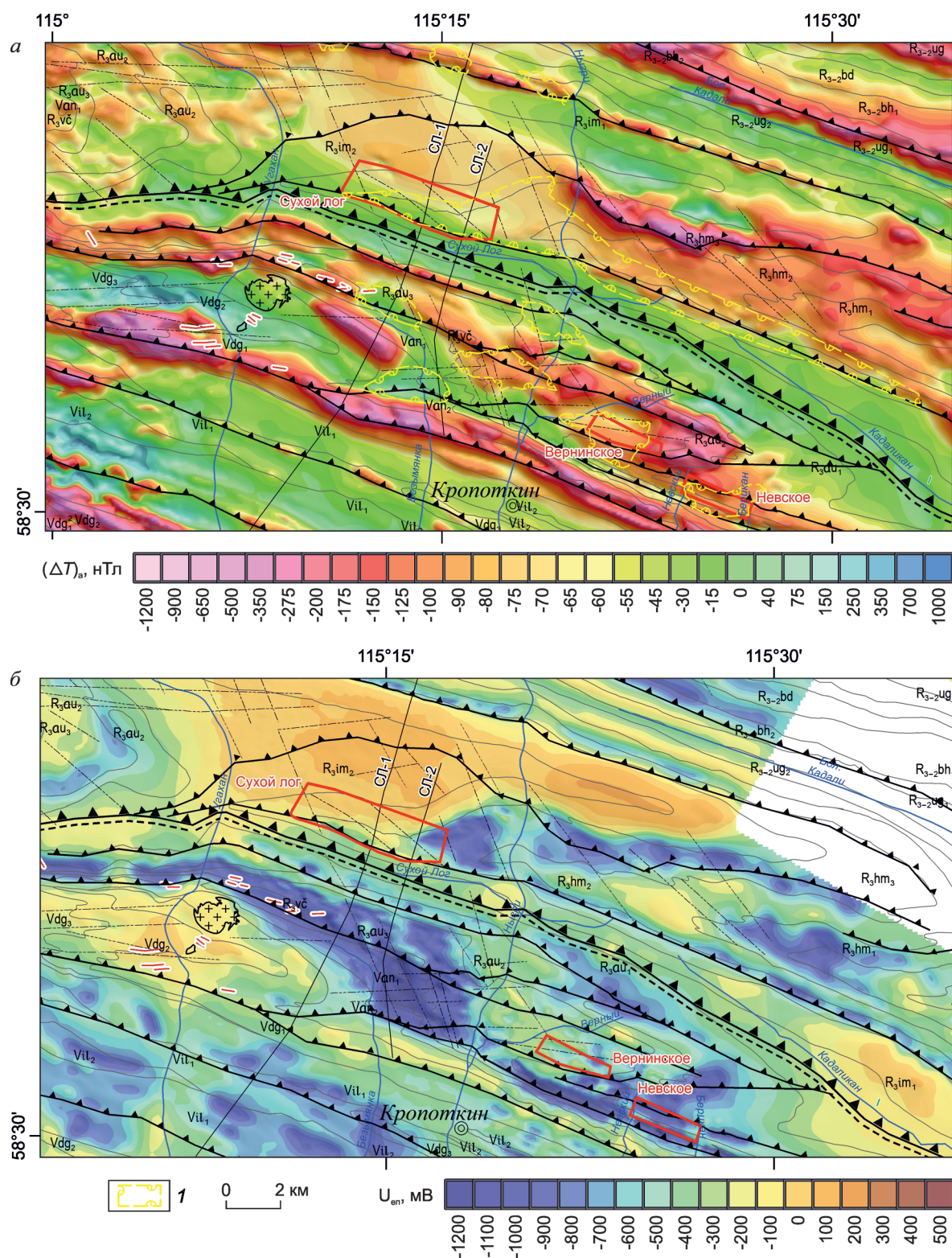


Рис. 5. Аномальное магнитное поле (а), потенциал естественного электрического поля (б) в пределах Кропоткинского рудного узла:

1 – зоны ослабления магнитного поля; остальные усл. обозн. см. рис. 1, 2

Вектор суммарной намагниченности в зонах пирротинизации в пределах Байкало-Патомской складчатой области, как правило, направлен в обратную сторону относительно современного магнитного поля Земли. Из-за кристаллографических особенностей пирротина ориентировка вектора намагниченности пирротинизированных пород в большинстве случаев согласована с направлением плоскостных тектонических структур: кливажа, сланцеватости и сместителей разломов.

О направлении вектора намагниченности и направлении падения разломов можно судить по асимметрии формы отрицательных аномалий $(\Delta T)_a$, а также наличию сопряжённых с ними положительных аномалий (см. рис. 3, б), которые обусловлены только взаимным соотношением направления падения пирротинизированной зоны и вектора её намагниченности. Значительные по интенсивности положительные аномалии $(\Delta T)_a$ характерны для пологих взбросо-надвигов. Положительная аномалия, соответственно, располагается над висячим блоком.

По результатам структурного анализа аномального магнитного поля для Бодайбинского золоторудного района установлено, что в замках складок усиливается интенсивность «пирротиновых» аномалий. Это обусловлено появлением пирротина на заключительном этапе складкообразования при короблении, отслоении и рассланцевании пород на границах жёстких блоков. Например, если ядро складки образовано относительно жёсткими песчаниками догалдынской свиты (R_3-Vdg). Интенсивность отрицательных аномалий и их пространственная неоднородность возрастают в местах усложнения складчатости и развития мелких складок высоких порядков, особенно в неоднородных по реологическим свойствам преимущественно углеродисто-терригенных толщах (хомолхинская, аунакитская свиты). Такие зоны усложнения структуры складчатости приурочены к крыльям и замкам складок II и III порядков. Именно такой «структурный» парагенезис магнитного поля и складчатых-разрывных деформаций, по нашему мнению, следует признать «нормальным» для Бодайбинского синклиория.

При рассмотрении с этих позиций особенностей магнитного поля над рудовмещающей Сухоложской антиклиналью виден его аномаль-

ный характер. Над выходами в замке антиклинальной складки углеродистых пород хомолхинской свиты, благоприятной для образования пирротина, наблюдается спокойное поле $(\Delta T)_a$, близкое к нулевому уровню. Область спокойного поля, или область разрушения «нормального» структурного рисунка поля $(\Delta T)_a$, охватывает всю замковую часть Сухоложской антиклинали и прослеживается от её периклинального замыкания на западе до верховьев руч. Кадаликан на востоке, вытягиваясь преимущественно вдоль Сухоложского надвига в подвёрнутом крыле одноимённой антиклинали. Соседнее Вернинское рудное поле также отмечается областью резкого ослабления поля $(\Delta T)_a$, но значительно меньшей по площади.

Детальными минералогическими и петрофизическими исследованиями в пределах Сухоложского рудного поля установлено, что содержание пирротина в пределах минерализованной зоны крайне низкое 0,29 % [3]. Его зёрна корродированы и заключены в более поздних генерациях пирита [24]. При этом наблюдается тенденция к увеличению содержания пирротина по падению минерализованной зоны. Намагниченность пород с обильной кварц-сульфидной минерализацией относительно низкая (0,1–0,25 А/м) в сравнении с намагниченностью зон пирротинизации (1–10 А/м) за пределами рудного поля, но значительно выше (в 3–4 раза) таковой пород, вмещающих минерализованную зону (хомолхинская, имнянская свиты). Вектор эффективной намагниченности в пределах минерализованной зоны имеет обратное направление относительно вектора современного нормального поля.

При этом дифференциации пород по χ в минерализованной зоне практически не происходит. Магнитная восприимчивость варьирует от $15 \cdot 10^{-5}$ до $45 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Некоторое её увеличение фиксируется в интервалах, насыщенных порфиروбластиками и прожилками железисто-магнезиальных карбонатов, что вызвано повышенной χ сидерита.

Выход на поверхность минерализованной зоны по данным наземной и аэромагнитной съёмок выделяется слабой аномалией типа «ступень» амплитудой до -50 нТл и слабым повышением изменчивости поля. Это определяется слабо отрицательной и неоднородной намагниченностью минерализованных углеродистых

пород в ядре антиклинали за счёт интенсивного, но неравномерного разрушения первичного метаморфогенного пирротина в результате его гидротермально-метасоматического преобразования. Судя по значительной площади участка ослабления магнитного поля над Сухоложской антиклиналью (см. рис. 5, а), метасоматическому преобразованию подвергся огромный объём пород.

Поле естественной радиоактивности. Результаты обработки аэрогаммаспектрометрии приведены на карте радиогеохимической зональности в виде цветового композита (рис. 6). Радиогеохимическая зональность вычислена методом «АРК» (аэроадиогеохимическое картирование) [14]. Метод «АРК» является модификацией метода главных компонент и эффективно удаляет из наблюденных гамма-полей в первую очередь ландшафтную составляющую поля, обусловленную различными условиями обнаженности, из-за чего эквивалентные содержания ЕРЭ и мощность экспозиционной дозы гамма-поля (МЭД) в значительной степени скоррелированы. В результате вычисляются надфоновые содержания ЕРЭ (K' , U' , Th'), выраженные в единицах стандартного отклонения (σ). Различным комбинациям надфоновых содержаний ЕРЭ соответствуют различные оттенки «классической» цветовой триады (калий – зелёный, торий – синий, уран – красный).

Такого рода классификационные построения позволяют чётко определить радиогеохимическую специализацию породных комплексов, а также в ряде случаев выявить ореолы гидротермально-метасоматических изменений пород. Так, наложенная серицитизация обычно выделяется высоким надфоновым калием. Иногда удаётся выявить определённую закономерную смену радиогеохимических классов в каком-либо направлении, что является следствием различной подвижности ЕРЭ в гидротермальном процессе.

Анализ АГС материалов разных лет показал, что углеродисто-алевросланцевые толщи (аунакитская, хомолхинская, вачская, анангская свиты) обладают повышенной радиоактивностью (7–10 мкР/ч), существенно песчаниковые (догалдынская свита) – пониженной (~5 мкР/ч). На более высокой радиоактивностью закономерно отмечается выход биотитовых лейкогранитов Константиновского штока (до 12–15 мкР/ч).

По характеру доминирующей природы радиоактивности породы разделяются на три группы: с калиевой компонентой (бужуихтинская, хомолхинская свиты); с ториевой, иногда торий-урановой (аунакитская, вачская); со смешанной калий-ториевой (догалдынская, илигирская).

Калиевая природа радиоактивности хомолхинской и бужуихтинской свит объясняется высоким содержанием метаморфогенного серицита (особенно в филлитовидных углеродистых сланцах хомолхинской свиты). Не совсем ясна торий-урановая природа радиоактивности пород вачской и аунакитской свит. Но, вероятнее всего, она определяется сорбцией соединений тория и урана в процессе осадконакопления морскими глинистыми осадками, особенно гидрослюдистого состава с высоким содержанием органики.

Уран обладает высокой подвижностью в гипергенных условиях, поэтому гамма-поле в урановом канале характеризуется наибольшей пространственной неоднородностью и более слабой корреляционной связью с калием и торием. Наблюдается тенденция к повышению содержания урана на заболоченных участках склонов долин. Кроме того, глубокие речные долины отмечаются интенсивными аномалиями урана из-за радоновой помехи (накопление тяжёлого радона в отрицательных формах рельефа).

Ядро Сухоложской антиклинали, сложенное породами хомолхинской свиты, выделяется интенсивной аномалией надфоновое калия ($2,8\sigma$), зоной «выноса» урана (-2σ) и почти нулевым уровнем надфоновое тория. При этом фиксируется общее понижение гамма-активности в общем канале (см. рис. 6, а). По результатам наземной гамма-спектрометрии на месторождении в разведочных горных выработках (штольня 1) установлено, что в пределах рудной зоны действительно происходит устойчивый, хотя и слабый, вынос урана (С.Ф.Зубарев, 1978 г.).

Такое же соотношение гамма-полей характерно для выходов хомолхинской свиты на хребте Ровный (севернее Сухоложского рудного поля). В конце 1970-х годов Ровнинский участок по данным литохимической съёмки рассматривался в качестве поискового, перспективного для выявления золото-сульфидной минерализации сухоложского типа. В пределах Ровнинской аномальной зоны надфоновое содержание ка-

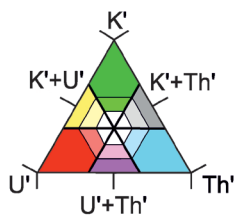


Рис. 6. Поле естественной радиоактивности МЭД (а), радиогеохимическая зональность (б) в пределах Кропоткинского рудного узла:

1 – контур АГС съёмки м-ба 1:25 000 (2013 г.);
остальные усл. обозн см. рис. 1, 2

лия достигает 5σ, и отмечается вынос урана. Вернинское и Невское рудные поля выделяются локальными аномалиями смешанной калий-урановой природы.

При совместном анализе данных АГС и структурно-формационной основы нами установлено, что метасоматические зоны, выявленные в ходе геологосъёмочных и поисковых работ, достаточно уверенно (60–70%) совпадают с положительными значениями разности надфоновых составляющих калия и тория ($K'-Th'$). Трансформация ($K'-Th'$) отчасти снимает породную специализацию, например ториевую для аунакитской свиты, и подчёркивает калий-урановые зоны, характерные для метасоматически изменённых пород. Соответственно, Сухоложское рудное поле отмечается высокими значениями $K'-Th'$ (см. рис. 6, б и 3, д).

Электрические поля. Основной объём электроразведки в пределах Бодайбинского рудно-россыпного района выполнен в 1970-х годах методом естественного электрического поля. Как показал опыт этих работ, метод наиболее эффективен для картирования углеродистых толщ. Углеродистым породам с содержанием углеродистого вещества ($C_{орг.}$) от 2–5% свойственно устойчиво низкое сопротивление от 10 до 500 Ом·м. При выходе их на поверхность развиваются интенсивные процессы окисления как собственно углеродистого вещества, так и вкрапленных сульфидов, широко распространённых в углеродистых сланцах и алевролитах. Самой большой электрохимической активностью обладают углеродистые алевросланцы в составе бужуихтинской (R_{2-3bh}), хомолхинской (R_{3hm}), аунакитской (R_{3au}) и вачской (R_{3vc}) свит, которые проявляют себя как яркие электрические маркирующие горизонты и уверенно выделяются интенсивными (от -400 до -1200 мВ) отрицательными аномалиями потенциала ЕП (см. рис. 5, б). При этом существует почти линейная связь между интенсивностью отрицательных аномалий $U_{ен}$ и средним содержанием $C_{орг.}$ в алевросланцевых толщах. Наиболее интенсивные аномалии (до -1300 мВ) приурочены к выходам вачской свиты, в которой количество $C_{орг.}$ местами составляет 10%. Содержание $C_{орг.}$ в углеродистых пачках рудовмещающей хомолхинской свиты в среднем не превышает 3%. Поэтому над выходами их на поверхность фиксируются аномалии $U_{ен}$ умень-

ренной интенсивности (в среднем от -500 до -800 мВ).

Участки, сложенные породами существенно песчаникового, известковисто-песчаникового и карбонатного составов с низким содержанием $C_{орг.}$ (<1%), отмечаются положительным полем $U_{ен}$ (от 0 до 200 мВ). Так, положительными аномалиями характеризуются ядра синклиналей, сложенных песчаниками догалдынской свиты, выходы имняхской (R_{3im}) и угаханской (R_{3ug}) свит, имеющие преимущественно карбонатный состав.

Анализ структуры поля $U_{ен}$ показал усиление интенсивности отрицательных аномалий в зонах тектонических нарушений. Скорее всего, это обусловлено процессами тектонического выдавливания $C_{орг.}$ в плоскости сланцеватости и кливажа, а также его псевдокристаллическим структурированием (образование антраколита и графитоидов), в результате которых в объёме породы образовались протяжённые высокопроводящие плёнки $C_{орг.}$. Аномалии ЕП тектонической природы просекают литологические границы и характеризуются отчётливой линейностью. Однако Кадали-Сухоложский надвиг, ярко проявленный в гравитационном поле, в поле $U_{ен}$ не выделяется. Это связано с тем, что надвиг развит по карбонатным безуглеродистым породам имняхской свиты.

Сухоложская рудовмещающая антиклиналь отчётливо выражается в поле $U_{ен}$ отрицательной аномалией, которая расширяется с запада на восток. Интенсивность аномалии также возрастает с запада на восток от -200 до -800 мВ. Такая структура аномалии определяется морфологией Сухоложской антиклинали, её постепенным расширением в восточном направлении и изгибом осевой поверхности, в результате которого породы приобретают более крутое падение на восточном фланге рудного поля. Кроме того, на восточном фланге поля на поверхность выходит наиболее углеродистая средняя пачка верхней подсвиты хомолхинской свиты ($R_{3hm_3^2}$).

В пределах выхода на поверхность минерализованной зоны на фоне отрицательного поля $U_{ен}$ выделяется узкая локальная положительная аномалия интенсивностью до +100 мВ. Она соответствует выходу на поверхность центральной рудной зоны, наиболее насыщенной кварцево-жильным материалом. Таким образом, минерализованная зона отличается повышенной неоднородностью структуры поля $U_{ен}$.

Подобный неоднородный характер поля $U_{\text{еп}}$ (с нарушенной нормальной линейной структурой) отмечается и в пределах Вернинского месторождения. Усложнение структурного рисунка поля $U_{\text{еп}}$ обусловлено не только наличием кварцево-жильной минерализации, но и неравномерным распределением $C_{\text{орг.}}$ и локальным увеличением содержания сульфидов. Поэтому, в принципе, любое локальное усиление пространственной неоднородности поля $U_{\text{еп}}$, по нашему мнению, можно рассматривать в качестве поискового признака минерализованной зоны.

В 2013 г. на месторождении Сухой Лог была впервые выполнена электроразведка методом аудиоманнителлурического зондирования. Зондирования проводились по линиям опорных профилей (СЛ-1 и СЛ-2) для уточнения глубинного положения маркирующих углеродистых горизонтов. В результате обработки данных АМТЗ построены разрезы удельного электрического сопротивления (УЭС) до глубины 1500 м.

На разрезе по профилю СЛ-1 (см. рис. 3, з) области низкого электрического сопротивления отвечают углеродисто-сланцевым толщам. Ядра синклиналей, сложенные породами имняхской, догалдынской и илигирской свит, маркируются областями высокого УЭС ($>1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). По разрезу удельного электрического сопротивления можно уточнить морфологию синклиналей, сложенных проводящими углеродистыми породами вачской и аунакитской свит. На разрезе видно, что блок высокого УЭС под долиной руч. Сухой Лог, соответствующий имняхской карбонатной толще, ограничен по глубине. Это позволяет предположить, что имняхские породы образуют сорванное по Кадали-Сухоложскому надвигу крыло опрокинутой синклинали. Осевая плоскость надвига на разрезе не выделяется из-за отсутствия проводящего углеродистого вещества в карбонатных породах.

Сухоложское рудное поле в разрезе отчетливо отмечается полого погружающейся на север проводящей зоной с УЭС $<10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Её ось почти точно соответствует осевой поверхности опрокинутой Сухоложской антиклинали. При этом отчетливо видно выполаживание проводящей зоны в северном направлении. Это, скорее всего, связано с усложнением северного крыла антиклинали и ядра сопряженной с ней Зоринско-Широкинской синклинали складками высоких порядков. Ядро проводящей зоны локализу-

ется на глубине, а не выходит на поверхность, что может говорить об усложненной глубинной структуре ядра рудовмещающей антиклинали. Это, в свою очередь, может указывать на наличие мощной минерализованной линзы, обогащенной $C_{\text{орг.}}$ и сульфидами.

По материалам площадного электропрофилирования с установками симметричного профилирования и срединного градиента, выполненного на Сухоложском участке во второй половине 1970-х годов (С.Ф.Зубарев, 1978 г.), выявлено почти точное соответствие структуры поля кажущегося удельного электрического сопротивления структуре поля $U_{\text{еп}}$ (рис. 7). Выходы углеродистых пород подчёркиваются аномалиями низкого ($10\text{--}500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) КС. Над Сухоложской антиклиналью графики КС имеют отчетливо асимметричный характер (рис. 8, в), что обусловлено пологим падением углеродистой проводящей толщи в осевой плоскости антиклинали. По резкому скачку сопротивления фиксируется контакт с имняхской свитой в южном подвёрнутом крыле антиклинали.

Кроме электропрофилирования, в 1977–1978 гг. на месторождении были осуществлены ВЭЗ-ВП в объёме $15,5 \text{ км}$ по линиям буровых разведочных линий. Одновременно исследовались поляризационные свойства горных пород, слагающих месторождение Сухой Лог, как по образцам, так и по данным каротажа ВП. Установлено, что углеродистые породы рудной зоны с интенсивной сульфидно-кварцевой минерализацией характеризуются аномально высокой поляризуемостью до 80%. Петрофизическими исследованиями образцов керна, отобранных из поисково-разведочных скважин буровой линии БЛ+17, выявлена устойчивая положительная корреляционная связь поляризуемости с объёмным содержанием сульфидов (см. рис. 4) и, соответственно, золота. По данным ВЭЗ-ВП осевая зона Сухоложской антиклинали выделяется наклонным пластом с избыточной поляризуемостью 20–80%.

В 2013–2014 гг. на опорных профилях СЛ-1 и СЛ-2 в пределах Сухоложского рудного поля нами выполнена электротомография методом ВП (ЭТ-ВП), которая является современной модификацией ВЭЗ-ВП с более высокой пространственной плотностью измерений и более изощрённой методикой решения обратной задачи. При измерении ЭТ-ВП использовалась ориги-

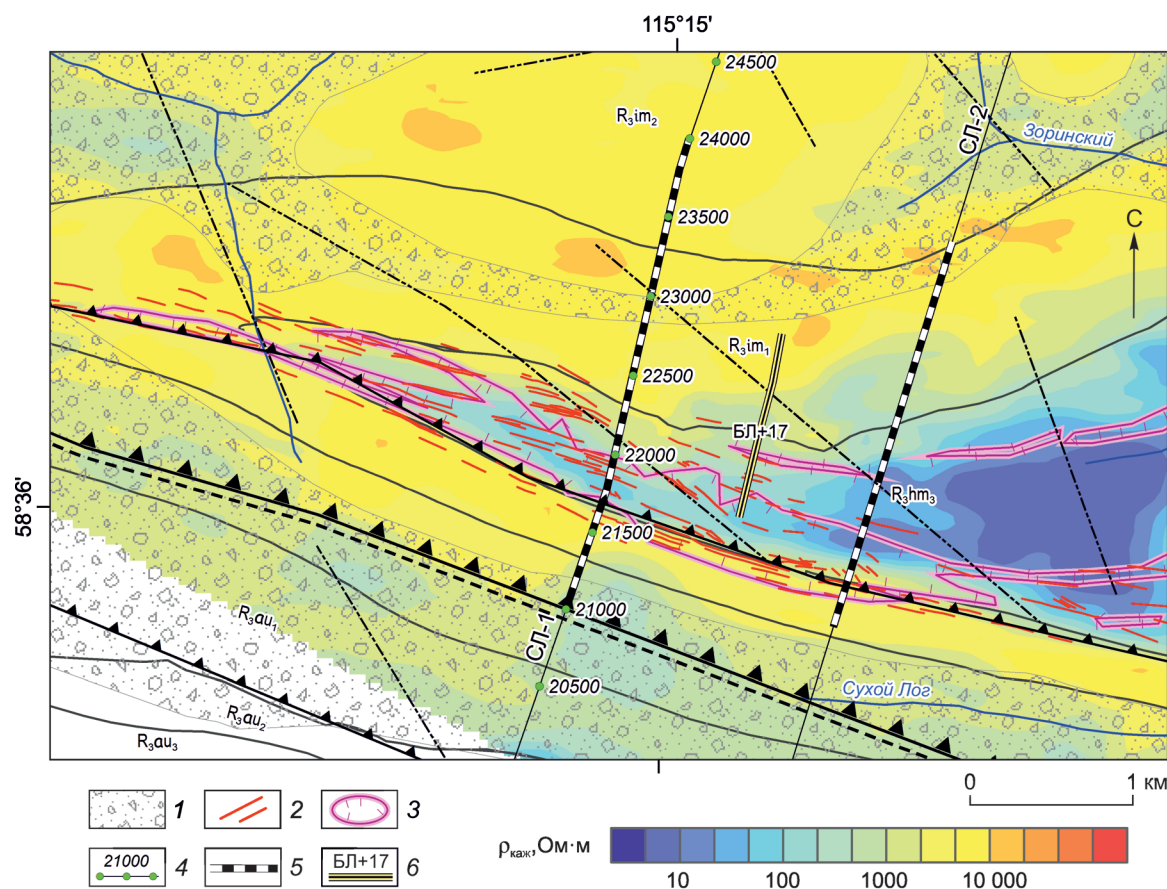


Рис. 7. Карта кажущегося удельного электрического сопротивления в пределах Сухоложского рудного поля (по материалам С.Ф.Зубарева, 1978 г.):

1 – четвертичные аллювиальные и моренные отложения; 2 – кварцевые и кварц-карбонатные жилы, по материалам В.К.Черепанова, 1988 г.; 3 – выходы на поверхность рудных тел (И.Ф.Мигачев и др., 2008 г.); 4 – опорные профили, номера пикетов; 5 – интервалы профилей с выполненной электротомографией методом ВП; 6 – буровая линия БЛ+17

нальная методика изучения временных характеристик ВП [5] для нахождения связи между динамикой процессов ВП и структурно-текстурными особенностями сульфидной минерализации в рудной зоне.

После решения 2D обратной задачи и спектральной обработки измерений ВП отстраивалась серия геоэлектрических разрезов: один удельного сопротивления и четыре поляризуемости. На разрезах, как и предполагалось, довольно отчётливо выделилась осевая часть складки в виде полого падающей проводящей зоны ($УЭС < 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) высоких значений стационарной поляризуемости (от 20 до 80%). Подобное соотношение параметров определяется, прежде всего, повышенным содержанием

проводящего и хорошо поляризуемого $S_{орг}$ и в меньшей степени повышенной концентрацией пирита. Главная рудная зона ($Au > 1 \text{ г/т}$) с относительно высоким объёмным содержанием сульфидов ($> 2\%$) и характерными крупными линзовидными и прожилковыми кварц-сульфидными выделениями отмечается высокой поляризуемостью с временем релаксации ВП (τ) $> 10 \text{ с}$. Время релаксации ВП вмещающих рудную зону углеродистых алевросланцев с тонкой и рассеянной вкрапленностью сульфидов значительно меньше, $\tau < 0,2 \text{ с}$.

Скорее всего, связь между временем релаксации ВП и структурно-текстурными особенностями кварц-сульфидной минерализации опосредована через структурные особенности рас-

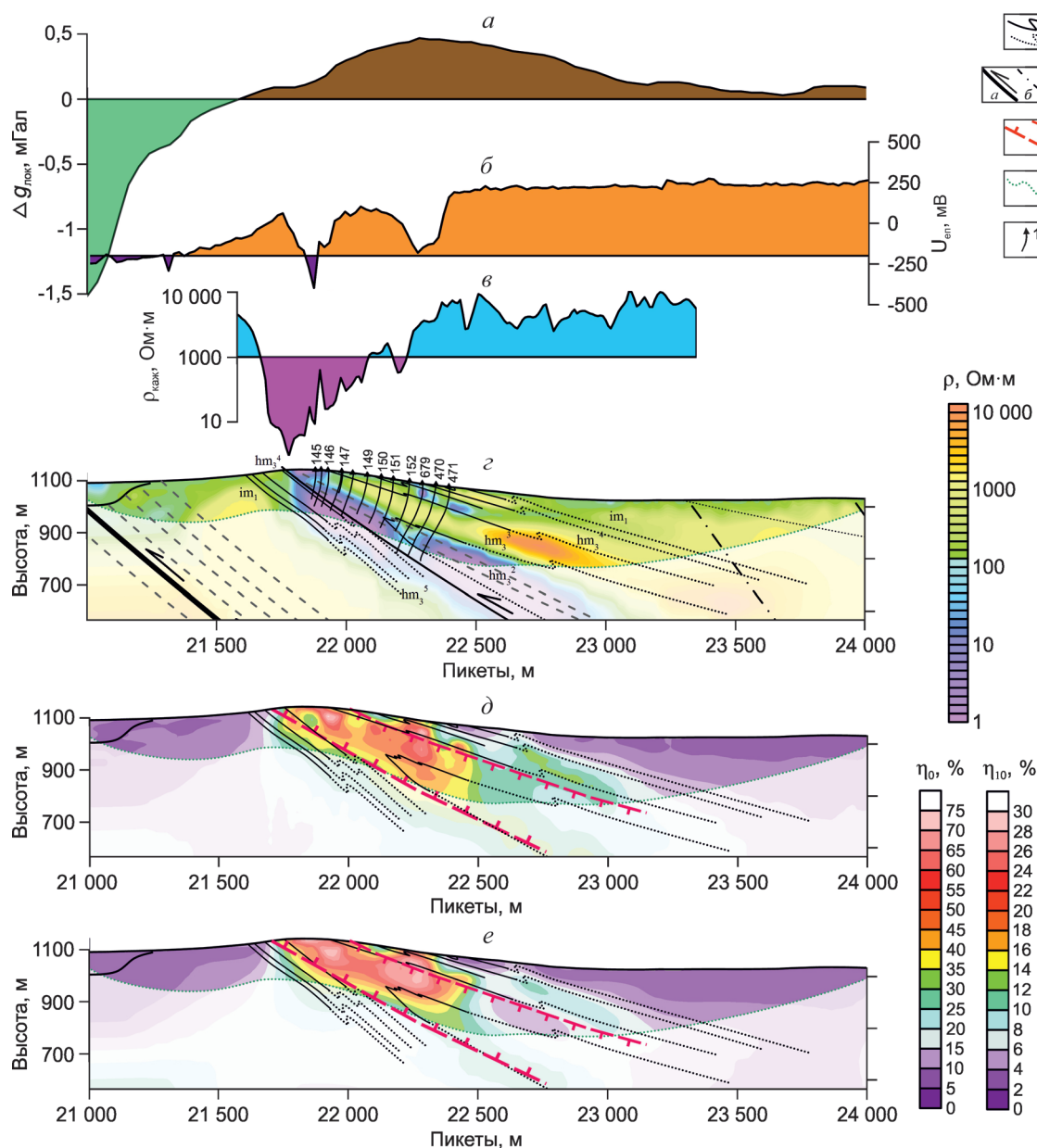


Рис. 8. Результаты электротомографии методом ВП по профилю СЛ-1, Сухоложское рудное поле:

а – локальная составляющая поля силы тяжести; *б* – потенциал естественного электрического поля; *в* – кажущееся удельное электрическое сопротивление (по данным профилирования ВП-СГ, С.Ф.Зубарев, 1978 г.); *г* – разрез удельного электрического сопротивления; *д* – разрез стационарной поляризуемости по результатам спектральной обработки; *е* – разрез поляризуемости (поздняя стадия поляризации, время релаксации >10 с); 1 – границы литолого-стратиграфических подразделений, их индексы; 2 – тектонические нарушения, выделенные по геолого-геофизическим данным (*а* – Кадали-Сухоложский и Сухоложский надвиги, *б* – секущие зоны складчато-разрывных дислокаций, *в* – зоны рассланцевания и смятия); 3 – генерализованный контур рудной зоны (И.Ф.Мигачев и др., 2008 г.); 4 – линия доверительной глубины зондирования; 5 – поисково-разведочные скважины БЛ-3 (С.Д.Шер, 1974 г.)

пределения $C_{орг.}$ в пределах рудной зоны. Вероятно, возникновение крупных линзовидных кварц-сульфидных агрегатов в рудной зоне сопровождалось образованием более структурно-упорядоченного $C_{орг.}$, которое, как и сульфиды, формирует укрупнённые агрегаты (сильно проводящие плёнки и стяжения). Однако эта гипотеза требует проверки и значительного количества лабораторных исследований образцов пород с одновременным изучением степени структурной упорядоченности углеродистого вещества и его поляризационных свойств.

Геолого-геофизические прогнозно-поисковые признаки Сухоложского рудного поля. Представленные геофизические материалы, на наш взгляд, достаточно убедительно показывают, что основные геологические факторы контроля и размещения Сухоложского рудного поля отражены в геофизических полях. Наиболее ярко проявлены тектонические факторы. Один из важнейших тектонических признаков – пространственная близость Сухоложского рудного поля к крупному региональному разлому надвиговой кинематики (Кадали-Сухоложскому надвигу), который выражен в поле силы тяжести сквозной линейной отрицательной аномалией. Разлом – основная структура, контролирующая размещение зон гидротермально-метасоматических изменений и магматических тел (Угаханский массив). Рядовые надвиги и сопряжённые с ними зоны расщепления маркируются отрицательными аномалиями магнитного поля за счёт образования пирротина, развитого в основном по углеродисто-сланцевым породам, и сквозными линейными отрицательными аномалиями $U_{ен}$ за счёт выдавливания углеродистого вещества в плоскости сланцеватости и образования сплошных электропроводящих зон.

Возможно, значительную роль в локализации золотого оруденения в пределах Сухоложского рудного поля играли системы секущих нарушений северо-западного направления, а также области пересечения их продольными надвиговыми зонами. Данные нарушения слабо отражены в геофизических полях и диагностируются лишь по слабым смещениям, изгибам, перегибам и разрывам линейных геофизических аномалий.

Литологические факторы, а именно размещение Сухоложского рудного поля в углеродистых алевросланцах хомолхинской свиты, хоро-

шо проявлены в электрических полях, прежде всего в поле $U_{ен}$ (отрицательные аномалии интенсивностью от -200 до -800 мВ), а также в гамма-полях (специализированные на калий области).

Участки гидротермально-метасоматических изменений в геофизических полях проявлены как области нарушения «нормальной» структуры полей, обусловленной сочетанием литологических и тектонических факторов. Наиболее ярко выражены ослабление интенсивности аномального магнитного поля и «размытие» его структуры в замке Сухоложской антиклинали за счёт разрушения первично-метаморфогенного пирротина. Кроме того, обнаружена область усложнения структуры поля $U_{ен}$ в пределах рудовмещающей углеродистой толщи вследствие перераспределения углерода в зонах локального смятия и тектонического нагнетания, а также образования кварцево-жильной зоны в области перегиба шарнира антиклинальной складки.

В локальной составляющей поля силы тяжести положительными аномалиями интенсивностью от 0,3 до 0,7 мГал уверенно отмечаются зоны крупнообъёмной железисто-магнезиальной карбонатизации. Причём для Сухоложского рудного поля положительная аномалия $\Delta g_{лок.}$ почти точно совпадает с областью промышленной золотоносности. Эта аномалия обусловлена существенным повышением плотности пород в пределах минерализованной зоны по отношению к вмещающим углеродистым алевросланцам (+0,11 г/см³) за счёт сульфидизации и карбонатизации. Однако подобных положительных аномалий $\Delta g_{лок.}$ в пределах рудного узла много. Часть их является следствием пространственной близости двух отрицательных аномалий, обусловленных повышенной мощностью четвертичных отложений или расщеплением пород. Точно природа аномалий $\Delta g_{лок.}$ может быть установлена только путём тщательного сопоставления различных геолого-геофизических признаков.

В разрезе рудолокализирующая структура (осевая плоскость антиклинали) уверенно распознаётся по наклонной проводящей зоне, которая хорошо выделяется различными методами электрических зондирований в разных масштабах (от 1:50 000 до 1:10 000). Непосредственно рудной зоне отвечает аномалия высокой поляризуемости (от 20 до 80%). Для неё намечается

пространственная связь между концентрацией золота и поляризуемостью, вероятнее всего, опосредованно через текстурно-структурные особенности углеродистого вещества в минерализованной зоне.

Стоит ещё раз упомянуть о близости слабо эродированного гранитного массива и связанной с ним отрицательной гравитационной аномалии к Сухоложскому рудному полю. По результатам формализованного прогнозирования на основе метода распознавания образов [2] установлено, что этот признак обладает наибольшим информационным весом среди всех геофизических признаков. Между тем, большинство исследователей придерживаются точки зрения о том, что большая часть орогенных золоторудных месторождений не имеет видимых пространственных связей с интрузивными комплексами [21]. Однако существует модель многоэтапного рудообразования [10] в пределах Байкало-Патомской металлогенической провинции, согласно которой окончательное формирование месторождения Сухой Лог произошло в пределах рудоконтролирующей тектонической зоны при наложении на метаморфогенную минерализованную зону сингранитных относительно низкотемпературных растворов. Поэтому вопрос о роли гранитного магматизма в формировании месторождения Сухой Лог, по-видимому, ещё ждёт своего ответа. А признак локализации Сухоложского рудного поля на периферии изометрического гравитационного минимума нами рассматривается в качестве дополнительного, неключевого, поискового признака.

В сжатом виде вышеперечисленные геофизические признаки представлены в таблице. Кроме описания признаков и их геологической интерпретации, в колонке «прогнозный вес» дана численная субъективная оценка прогнозной значимости признаков по трёхбалльной шкале. В принятой шкале максимальный вес 3 уникален, проявлен только для Сухоложского рудного поля. Придан региональному линейному гравитационному минимуму, соответствующему Кадали-Сухоложскому надвигу. Наличие такой тектонической зоны глубокого заложения и неоднократно активизированного в процессе структурно-тектонической эволюции Байкало-Патомского региона, по-видимому, – необходимое условие для формирования большеобъёмного золоторудного объекта. Ослабление ин-

тенсивности аномального магнитного поля, вероятно, не является однозначным поисковым признаком, поэтому имеет вес 1,5. Скорее всего, данный признак зависит от метаморфического фактора, а именно фации регионального метаморфизма. Возможно, участки ослабления магнитного поля над зонами метасоматических изменений характерны лишь для зоны зеленосланцевого регионального метаморфизма. По результатам наших работ в пределах Светловского рудного поля (Тунгусский рудный узел), было установлено, что при повышении фации регионального метаморфизма (до изограды биотита) зоны наложенных изменений могут, напротив, отмечаться локальными зонами усиления контрастности магнитных аномалий и локальным усложнением их пространственной структуры за счёт новообразования пирротина уже по гидротермальному пириту.

Локальная положительная аномалия поля силы тяжести – важный поисковый признак наличия минерализованной зоны. Скорее всего, он проявлен для большинства кварц-золото-сульфидных месторождений, локализованных в черносланцевых комплексах, из-за развития предшествующей рудоотложению крупнообъёмной карбонатизации, серицитизации и сульфидизации. Но неоднозначность выделения положительных аномалий $\Delta g_{\text{лок.}}$ не позволяет придать этому признаку максимально высокий вес 3. По нашей оценке, он должен иметь вес 2.

Расположение рудного поля вблизи слабо эродированного гранитного массива не является обязательным условием формирования большеобъёмной золоторудной минерализации. Поэтому близость рудного поля к изометрическому гравитационному минимуму имеет вес 1.

Что касается перспектив Сухоложского рудного поля, то выявление промышленной минерализации наиболее вероятно на нижнем и северном его флангах, а именно в ядре антиклинали и в северном висячем крыле на нижних гипсометрических уровнях. Это вытекает, прежде всего, из результатов глубинного зондирования методом АМТЗ (увеличение электропроводности на нижних горизонтах).

Кроме того, следует обратить внимание и на южный фланг рудного поля, на область, прилегающую к осевой зоне Кадали-Сухоложского надвига. Здесь по результатам электроразведки (АМТЗ и ЕП) блок карбонатных пород имнях-

Геолого-геофизические прогнозно-поисковые признаки Сухоложского рудного поля

Геофизические признаки	Прогноз- ный вес	Геологическая интерпретация	Геологические факторы, элементы прогнозной модели
Близость к региональному линей- ному минимуму, проявленному в локальных составляющих поля си- лы тяжести	3	Региональная тектоническая зона (смятия и интенсивного расслан- цевания), обусловленная сквозным глубинным разломом в фундамен- те и складчатом чехле, надвиговой кинематики	Тектонические зоны, через которые осуществляется основной флюид- ный массоперенос
Периферия изометрического гра- витационного минимума (4–5 км от центра)	1	Надынтрузивная зона слабоэроди- рованного гранитного массива што- кообразной морфологии	Периферия надынтрузивных зон с проявлением гидротермально-ме- тасоматических процессов
Отрицательные аномалии потен- циала ЕП и аномалии низкого КС	1	Терригенные углеродисто-сланце- вые толщи с вкрапленной сульфид- ной минерализацией	Рудовмещающие литологические комплексы
Интенсивные калиевые анома- лии, хорошо проявленные в над- фоновых компонентах гамма-по- ля	1	Филлитовидные слюдисто-углеро- дистые сланцы хомолхинской свиты	Рудовмещающие литологические комплексы
Наклонные зоны низкого УЭС (в разрезе), приуроченные к осевым зонам антиклиналей (по данным зондирования методами АМТЗ и ВЭЗ)	2	Зоны интенсивного смятия, пласти- ческого нагнетания углеродистого вещества и рассланцевания в пре- делах углеродисто-сланцевых ком- плексов	Рудолокализирующие тектонические зоны в пределах углеродисто-слан- цевых толщ
Обширные области ослабления и разрушения «нормальной» струк- туры магнитного поля	1,5	Разрушение первично-метаморфо- генного пирротина в пределах тек- тонических зон за счёт привноса серы и образования наложенной пиритизации	Околорудные метасоматические изменения
Локальные области выноса (пе- рераспределения урана) и повы- шенные значения $K'-Th'$ (разницы надфоновых компонент калия и тория)	1	Наложённая интенсивная серици- тизация	Околорудные метасоматические изменения (калиевый метасома- тоз)
Положительная локальная анома- лия поля силы тяжести интенсив- ностью 0,3–0,7 мГал, пространст- венно сопряжённая с линейным минимумом	2	Интенсивные железисто-магнези- альная карбонатизация (буропата- тизация), серицитизация и сульфид- изация, приуроченные к всяческому блоку надвиговой зоны	Минерализованная зона
Участки повышенной дисперсии потенциала ЕП в пределах ано- мальных зон	1,5	Области интенсивного перераспре- деления углеродистого вещества, а также образование крупнообъём- ной жильно-прожилковой зоны кварц-карбонатного состава	Рудолокализирующие тектонические зоны в углеродисто-сланцевых тол- щах, а также верхняя часть мине- рализованной зоны (жильная зона)

Примечание. Шкала прогнозной значимости признаков: 1 – признак, проявленный на площади золоторудного рай-
она, но тем не менее обязательный при локализации перспективных участков сухоложского типа; 1,5 и 2 – признаки
соответствуют благоприятным рудолокализирующим структурам и ореолам гидротермально-метасоматической обра-
ботки; 3 – признак «уникальный», проявлен только в пределах Сухоложского рудного поля.

ской свиты ограничен на глубину, и на нижних горизонтах (200–300 м от поверхности) в интенсивно смятых породах хомолхинской свиты возможна кварц-золото-сульфидная минерализация. По совокупности геофизических признаков (ослабление и разрушение структуры поля $(\Delta T)_a$, локальные аномалии надфонового калия и $\Delta g_{\text{лок.}}$), вероятно обнаружение золоторудной минерализации к востоку от рудного поля (левобережье р. Ныгри) в области, примыкающей к южному подвёрнутому крылу Сухоложской антиклинали.

Рассмотренные геофизические признаки в какой-то мере могут считаться элементами общей прогнозно-поисковой модели большеобъёмного золоторудного месторождения, локализованного в углеродисто-терригенных комплексах [17]. По нашему мнению, использование этих признаков наряду со структурно-геологическими, геохимическими и др. может существенно повысить эффективность прогнозных построений на уровне 1:100 000–1:50 000 м-ба не только на территории Байкало-Патомской золоторудной провинции, но и в пределах других металлогенических провинций, сложенных углеродисто-терригенными комплексами (Чукотская, Енисейская, Верхояно-Колымская, Таймырская). Очевидно, что использование этих признаков наталкивается на существенное ограничение, связанное с неравномерностью и неполнотой геофизической изученности прогнозных территорий. В этом плане Бодайбинский золоторудный район отличается геофизической изученностью. Верхояно-Колымская, Чукотская и Таймырская провинции в лучшем случае обеспечены лишь крупномасштабной аэромагнитной съёмкой. Отчасти эту проблему могут решить комплексные поисковые работы по линиям опорных профилей, но без крупномасштабных (1:25 000) площадных надёжно выделить участки даже ранга рудного поля, на наш взгляд, невозможно. Следовательно, перспективные поисковые площади, выделенные по результатам металлогенического анализа, должны быть обеспечены крупномасштабными геофизическими съёмками (м-ба 1:25 000–1:50 000).

Кроме традиционных методов аэрогеофизики (магниторазведка и АГС), в комплекс геофизических исследований должна быть включена электроразведка (наземная съёмка ЕП или аэро-

электроразведка (ДИП)) и обязательно гравиразведка. Пример Бодайбинского района показал, что углеродисто-терригенный комплекс пород исключительно контрастно и ярко выделяется в электрических полях, а детальное картирование электрических аномалий литологической природы (над выходами углеродистых пород) позволяет существенно уточнить структурно-тектонический каркас поисковых площадей, особенно в условиях слабой обнажённости.

Без сомнения, геофизические методы при прогнозно-поисковых работах позволяют решать прежде всего структурно-картировочные задачи. Однако пример использования крупномасштабной гравиразведки в пределах Сухоложского рудного поля показал, что существуют обоснованные предпосылки её применения для выделения минерализованных зон. Достоверность и надёжность выделения перспективных положительных локальных аномалий поля силы тяжести над зонами интенсивного уплотнения пород обеспечиваются в основном высокой пространственной плотностью гравиметрических наблюдений, которая может быть достигнута только при площадных работах.

Кроме того, в поле силы тяжести лучше проявлены крупные тектонические нарушения, которые в других геофизических полях могут слабо проявляться или не проявляться вообще. Несомненно также, что прогнозно-поисковая эффективность геофизических методов во многом зависит от знания петрофизических закономерностей и их связей с вещественным составом пород. В настоящее время петрофизические исследования при поисках практически не ведутся. Поэтому даже качественно выполненные геофизические съёмки имеют низкую картировочную и поисковую информативность из-за неясной геологической природы выявленных геофизических аномалий.

Следует продолжить работы по сбору и обобщению крупномасштабных геофизических материалов для золоторудных объектов с признаками большеобъёмного оруденения, например для Наталкинского (Верхояно-Колымская провинция), Олимпиадинского (Енисейская), Майского (Чукотская) и др. в целях создания общей прогнозно-поисковой модели большеобъёмного золоторудного месторождения и выделения сквозных универсальных поисковых геофизических признаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона* / В.К.Немеров, А.М.Станевич, Э.А.Развозжаева и др. // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 729–747.
2. *Боровко Н.Н.* Алгоритм «Тау» для распознавания при малом объёме эталонной выборки // Методы разведочной геофизики. 1972. Вып. 15. С. 35–42.
3. *Буряк В.А., Хмелевская Н.М.* Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). – Владивосток: Дальнаука, 1997.
4. *Вуд Б.Л., Попов Н.П.* Гигантское месторождение золота Сухой Лог (Сибирь) // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 3. С. 315–341.
5. *Гурин Г.В., Тарасов А.В., Ильин Ю.Т., Титов К.В.* Использование дебаевской декомпозиции для анализа данных профилирования методом вызванной поляризации (золото-серебряное месторождение Джүлөттө, Магаданская область) // Геология и геофизика. 2015. № 12. С. 2222–2239.
6. *Докембрий Патомского нагорья* / А.И.Иванов, В.И.Лифшиц, Т.М.Перевалов и др. – М.: Недра, 1995.
7. *Духовский А.А., Шолпо Л.Е., Артамонова Н.А.* Пирротин как источник магнитных аномалий // Физика Земли. 1998. № 5. С. 11–22.
8. *Золоторудное месторождение Сухой Лог – переоценка и оценка прогноза рудного поля и района* / И.Ф.Мигачёв, И.А.Карпенко, А.И.Иванов и др. // Отечественная геология. 2008. № 2. С. 55–67.
9. *Иванов А.И.* Закономерности формирования золоторудных месторождений Бодайбинского рудного района и новые аспекты их поисков // Разведка и охрана недр. 2004. № 8–9. С. 17–23.
10. *Иванов А.И.* Золото Байкало-Патомы (геология, оруденение, перспективы). – М.: ФГУП ЦНИГРИ, 2014.
11. *Казакевич Ю.П., Шер С.Д., Жданова Т.П.* Ленский золотоносный район // Тр. ЦНИГРИ. 1971. Вып. 85. Т. 1.
12. *Карпенко И.А., Черемисин А.А., Куликов Д.А.* Морфология, условия залегания и внутреннее строение рудных тел на месторождении Сухой Лог // Руды и металлы. 2008. № 2. С. 11–26.
13. *Корольков А.Т.* Геодинамика золоторудных районов Сибири. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2007.
14. *Краснов А.И., Высокоостровская Е.Б., Zubov E.I.* Аэрорадиогеохимическое картирование. Методические рекомендации. – Л.: НПО «Рудгеофизика», 1983.
15. *Лишневский 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.
16. *Методические рекомендации по геофизическому обеспечению геологосъемочных работ масштаба 1:200 000* / М.Н.Столпнер (отв. исп.), В.Л.Альтман, В.С.Антипов и др. – СПб.: МПР РФ, ВИРГ-Рудгеофизика, 2000.
17. *Многофакторные поисковые модели золоторудных месторождений* / Под ред. М.М.Константинова, В.А.Нарсеева. – М.: ЦНИГРИ, МПР СССР, 1989.
18. *Перевалов О.В., Срывцев Н.А.* Геологическое строение и минерализация Бодайбинского и Мамского горнорудных районов. – М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2013.
19. *Соколов С.В.* Комплекс геофизических признаков локализации оруденения золотосульфидного типа (Ленский золоторудный район) // Записки горного института. 2009. Т. 181. С. 28–30.
20. *Applications of Geophysical Inversions in Mineral Exploration Problems* / D.W.Oldenburg, Y.Li, C.G.Farquharson et al. // The Leading Edge. 1998. Vol. 17. P. 461–465.
21. *Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes* / R.J.Goldfarb, T.Baker, B.Dubé et al. // Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists One Hundredth Anniversary Volume 1905–2005, 2005, Tulsa, Society of Economic Geologists. P. 407–450.
22. *Ferry J.M.* Petrology of graphitic sulfide-rich schists from south-central Maine: An example of desulfidation during prograde regional metamorphism // American Mineralogist. 1981. Vol. 66. P. 908–930.
23. *Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia* / V.V.Distler, M.A.Yudovskaya, G.L.Mitrofanov et al. // Ore Geology Reviews. 2004. Vol. 24. P. 7–44.

24. *Multistage Sedimentary and Metamorphic Origin of Pyrite and Gold in the Giant Sukhoi Log Deposit, Lena Gold Province, Russia* / R.R.Large, V.V.Maslennikov, F.Robert // *Economic Geology*. 2007. Vol. 102. P. 1233–1267.

Тарасов Андрей Вячеславович,
кандидат геолого-минералогических наук
avtarasov@mail.ru

Гурин Григорий Владимирович,
кандидат геолого-минералогических наук
gurin-geo@mail.ru

PREDICTION/PROSPECTING GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL FEATURES OF SUKHOI LOG ORE FIELD

A.V.Tarasov,
G.V.Gurin

Unpublished materials of large-scale geophysical studies within the largest Russian gold deposit, Sukhoi Log, are presented. The deposit has been studied by various geological and geophysical methods for a long time. Most of the geological results was published while geophysical data remained in production reports. It is shown that geophysical fields display the important features of Sukhoi Log geological structure. Analysis of geological and geophysical materials allowed to identify a number of geological and geophysical prediction/prospecting features of Sukhoi Log which are general for large-tonnage black shale-hosted deposits.

Key words: Sukhoi Log ore field, Kropotkin ore cluster, prediction/prospecting features, gravity field, anomalous magnetic field, natural electric field, electric prospecting, electric tomography.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ В ЖУРНАЛ «РУДЫ И МЕТАЛЛЫ»

1. Статьи направляются на e-mail: rudandmet@tsnigri.ru, rudandmet@yandex.ru.
2. К тексту прилагаются документы: письмо (разрешение на опубликование) руководителя учреждения, экспертное заключение о возможности публикации в открытой печати, сведения об авторе (авторах) – имя, отчество, фамилия, место работы, должность, учёная степень, учёное звание, телефон, e-mail. В конце статьи ставятся подписи всех авторов.
3. Обязательно наличие УДК, аннотации (5–7 предложений) и ключевых слов на русском и английском языках.
4. Максимальный объём статьи – 20 страниц в редакторе MS Word, включая таблицы, графику, список литературы. Таблицы и рисунки помещаются в отдельные файлы (их максимальный размер 23×16 см).
5. Для набора математических формул рекомендуется использовать MS Equation 3.0. Все используемые символы, сокращения и аббревиатуры необходимо расшифровать. Десятичный символ – запятая (0,47); между цифрами – тире без пробелов (5–10); кавычки – «ёлочки».
6. Иллюстративные материалы (не более 5–7) представляются в цветном или чёрно-белом варианте в одном из следующих форматов: CDR для векторной графики, JPG, BMP, TIFF для фотографий, диаграмма MS Excel. Подписи прилагаются на отдельной странице после списка литературы.
7. Список литературы приводится в конце статьи и оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. Ссылки в тексте на источник даются соответствующим порядковым номером в квадратных скобках. Неопубликованные работы в список не включаются, при необходимости на них делается ссылка в тексте, например (А.А.Иванов, Б.Б.Петров, 2003 г.).
8. Направление в редакцию работ, опубликованных ранее или же намеченных к публикации в других изданиях, не допускается.