

УДК 553.411:550.83
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5304
Шифр специальности ВАК: 1.6.9
Научная статья



Золоторудное месторождение Сухой Лог (Патомское нагорье). Часть II. Структура геофизических и радиогеохимических полей

Ю.В. Колмаков[✉], В.В. Слоквенко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]kolmakovyv@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Месторождение Сухой Лог формировалось в течение длительного геологического времени за несколько этапов. Имеются серьезные разногласия в выделении ключевых этапов рудогенеза этого уникального месторождения, что сохраняет неопределенность в отношении главной проблемы, его происхождения – метаморфогенно-гидротермального или магматогенно-гидротермального. При этом в процессе её решения очень мало привлекались результаты геофизических исследований, системный анализ которых, в дополнение к уже существующим геологическим, геохимическим и геохронологическим исследованиям, позволит приблизиться к решению этой проблемы и существенно уточнить прогнозно-признаковую базу для геофизического поиска перспективных участков. Данная работа продолжает цикл статей, посвященных геологии и геофизике уникального золоторудного месторождения Сухой Лог. **Цель** этой статьи заключается в детальном анализе структуры геофизических и радиогеохимических полей для выделения аномальных зон с признаками формирования в разное время и в разных условиях, отражающих многоэтапную эволюцию месторождения, а также в выявлении связи этих зон с распределением золоторудной минерализации. **Методы.** Анализировались физические поля, исследованные методами наземной магниторазведки, гравиразведки и электроразведки, а также радиогеохимические поля распределения урана, тория и калия, полученные по результатам аэрогамма-спектрометрической съёмки. **Результаты и выводы.** Установлены три геофизические обстановки, образование которых происходило в разное время и в разных условиях. Формирование наиболее ранних аномалий связывается с этапом дислокационного метаморфизма, их особенностью является стратиформный облик и высокая подчиненность структурным элементам Сухоложской антиклинали. Признаки продуктов второго и третьего этапов указывают на их гидротермально-метасоматическую природу: ослабевает или утрачивается полностью влияние пликативной тектоники на их размещение и возрастает влияние разрывных нарушений. Установлены косвенные признаки связи третьего этапа рудогенеза с герцинским гранитоидным магматизмом. Отчетливо выражено резкое увеличение объема и качества руд на участках с признаками гидротермально-метасоматической проработки, особенно это касается третьего, заключительного этапа. Дан прогноз скрытого на глубине оруденения в имняжских отложениях на северо-западной окраине площади аэрогеофизических исследований.

Ключевые слова: Бодайбинский золоторудный район, золотое оруденение, структура геофизических полей, генезис месторождения, геофизическая характеристика

Благодарности: Авторы выражают благодарность В.М. Керцману и Е.В. Молайнену, ООО «Геотехнологии», за предоставленные аэрогеофизические данные.

Для цитирования: Колмаков Ю.В., Слоквенко В.В. Золоторудное месторождение Сухой Лог (Патомское нагорье). Часть II. Структура геофизических и радиогеохимических полей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 10. – С. 178–191. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5304

UDC 553.411:550.83
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5304
Scientific paper



Sukhoy Log gold ore deposit (Patom Highlands). Part II. The structure of geophysical and radio-geochemical fields

Yu.V. Kolmakov✉, V.V. Slokvenko

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉kolmakovyv@tpu.ru

Abstract. Relevance. The formation of the Sukhoy Log deposit is believed to have occurred over a protracted geological period, through multiple phases. There are significant disagreements regarding the identification of the key stages of ore genesis in this unique deposit, which engenders uncertainty regarding the main issue, namely its origin – metamorphogenic-hydrothermal or magmatic-hydrothermal. Concurrently, the results of geophysical studies have been utilised to a limited extent in solving this problem. A systematic analysis of these results, in addition to existing geological, geochemical, and geochronological studies, will facilitate progress towards a resolution to this issue and significantly refine the predictive and indicative basis for the geophysical search for promising sites. This work continues a series of articles devoted to the geology and geophysics of the unique Sukhoy Log gold deposit. **Aim.** To conduct a detailed analysis of the structure of geophysical and radio-geochemical fields in order to identify anomalous zones with signs of formation at different times and under different conditions, thereby reflecting the multi-stage evolution of the deposit, as well as to reveal the connection between these zones and the distribution of gold mineralization. **Methods.** The present study analyzed physical fields obtained from ground-based magnetic, gravity, and electrical surveys, as well as radio-geochemical fields of uranium, thorium, and potassium distribution obtained from aerial gamma-ray spectrometry surveys. **Results and conclusions.** The authors have identified three distinct geophysical settings, which were formed at different times and under different conditions. The formation of the earliest anomalies is associated with the stage of dislocation metamorphism; their distinctive feature is their stratiform appearance and high subordination to the structural elements of the Sukholozhskaya anticline. Features of the second and third stages indicate their hydrothermal-metasomatic nature: the effect of plicative tectonics on their localization weakens or disappears completely, and the impact of fault tectonics increases. Indirect evidence of a connection between the third stage of ore genesis and Hercynian granitoid magmatism was established. There is a marked increase in the volume and quality of ores in areas with signs of hydrothermal-metasomatic processing, especially in the third, final stage. A forecast of hidden mineralisation in carbonate rocks of the Imnyakh suite on the north-western edge of the aerogeophysical research area was made.

Keywords: Bodaybo gold-bearing region, gold mineralization, structure of geophysical fields, genesis of the deposit, geophysical characteristics

Acknowledgements: The authors are grateful to V.M. Kertsman and E.V. Molainen, LLC «Geotekhnologii» for the provided aerogeophysical data.

For citation: Kolmakov Yu.V., Slokvenko V. Sukhoy Log gold ore deposit (Patom Highlands). Part II. The structure of geophysical and radio-geochemical fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 10, pp. 178–191. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5304

Введение

В работе [1] публикуемого цикла статей, посвященных месторождению Сухой Лог, были рассмотрены геодинамическая обстановка Бодайбинского золоторудного района и геологическое строение месторождения, а также были проанализированы взгляды на его формирование. Несмотря на то, что на данный момент вопрос о вкладе различных этапов в рудогенез Сухого Лога остается дискуссионным, многоэтапность его формирования как таковая ни у кого сомнений не вызывает, что подтверждается результатами многочисленных геохронологических исследований [2–6]. В частно-

сти, для заключительного этапа развития руд выделены два возрастных пика 375 ± 20 и 288 ± 22 млн лет [7] и синхронизированы с внедрением двух фаз герцинского гранитоидного магматизма ~ 350 и ~ 290 млн лет, одним из производных которого является Константиновский массив, расположенный южнее месторождения [8, 9].

Выявление закономерностей распределения золоторудной минерализации в породах с аномальными физическими свойствами с целью повышения эффективности геофизических поисков было и остается привлекательной проблемой для многих исследователей на примере самых разных место-

рождений мира [10–17]. Исходя из имеющегося опыта исследований петрофизических неоднородностей полигенных и полихронных золоторудных объектов различного уровня организации [18–20], предполагается, что многоэтапное развитие месторождения Сухой Лог привело к формированию соответствующих каждому этапу петрофизических комплексов, которые, в свою очередь, находят отражение в физических полях. Первым шагом на пути исследования геофизической неоднородности минералообразующей системы месторождения будет являться анализ структуры его физических полей.

По результатам доразведки флангов месторождения были открыты новые рудные зоны, что позволило в пределах Сухоложской антиклинали выделять уже не одно месторождение Сухой Лог, а целое рудное поле под тем же именем. В современных представлениях рудное поле поделено на три геологических блока: западный, центральный и восточный (Карпенко И.А. и др., 2007). Само месторождение Сухой Лог, включающее главное рудное тело, находится в центральном блоке. Фланговые блоки по объему и качеству руд сильно уступают центральному, но их открытие привело к значительному приросту общих запасов рудного поля. Основные запасы – 84,4 % – сосредоточены в рудной зоне центрального блока, здесь развиты все разновидности руд, которые по содержаниям Au разделены на убогие (0,2–0,5 г/т), бедные (0,5–1,5 г/т) и рядовые (более 1,5 г/т). В западном блоке сокращается доля рядовых руд, его вклад в общие запасы рудного поля составляет 10,5 %. В динамосланцах восточного блока оруденение очень невыдержанное и фрагментарно локализуется в пачках верхнехомулхинской подсвиты. Руды здесь преимущественно убогие, рядовых нет совсем, их доля в общих запасах составляет 5,1 %. При анализе структуры геофизических полей их районирование тоже было главным образом подчинено блоковому строению рудного поля.

Гравитационное поле

Исходные регионально метаморфизованные породы хомулхинской и имняхской свит слабо дифференцированы по плотности – от 2,68 до 2,7 г/см³ [21]. В аномальном поле силы тяжести (Δg) на схеме локальных аномалий масштаба 1:10000 (рис. 1), охватывающей территорию месторождения, им соответствуют фоновые, близкие к нулевым, значения. Северная часть участка, в которой распространены отложения верхнеимняхской подсвиты, наименее контрастно, на уровне фона, проявлена в аномальном поле силы тяжести. Слабые по величине локальные линейные минимумы Δg от –0,2 до –0,4 мГл наблюдаются вдоль долин ручьев, где распространены рыхлые русловые отложения.

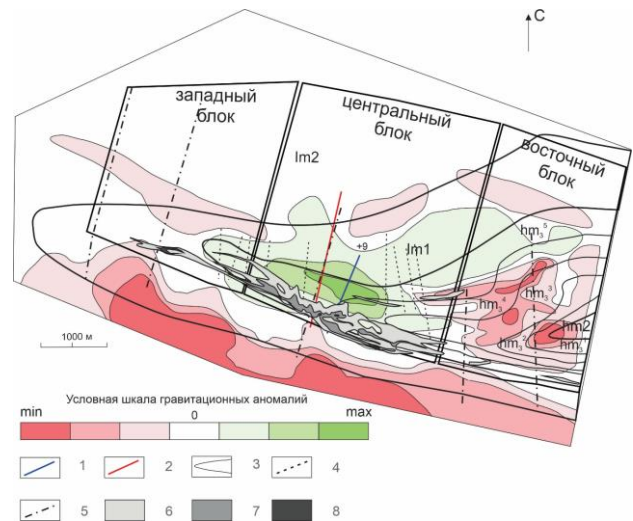


Рис. 1. Схема аномалий силы тяжести месторождения Сухой Лог (Попов Н.П. и др., 1977): 1 – положение бурового профиля +9; 2 – линия геоэлектрического разреза главного рудного тела; 3 – границы стратиграфических подразделений; 4, 5 – тектонические нарушения: достоверные (4) и предполагаемые по аэрогеофизическим данным (5); 6–8 – выходы рудных тел на дневную поверхность: 6 – убогих руд, 7 – бедных руд, 8 – рядовых руд

Fig. 1. Gravity anomaly scheme of the Sukhoy Log deposit (N.P. Popov et al., 1977): 1 – position of the drilling profile +9; 2 – line of the geoelectric section of the main ore body; 3 – boundaries of geological units; 4, 5 – faults: actual (4) and assumed by aerogeophysical data (5), 6–8 – ore bodies outcrops: 6 – poor-grade, 7 – low-grade, 8 – high-grade

На юге рассматриваемого участка наблюдается интенсивная отрицательная аномалия со значениями в широком диапазоне от –0,2 до –2 мГл, простирающаяся практически вдоль всей его южной границы. Она является крайним северным фрагментом крупного гравитационного минимума, создаваемого Константиновским гранитным массивом, в той его части, где он не выходит на дневную поверхность, а скрыт под отложениями жуинской серии. Из всех пород, распространенных в Бодайбинском синклинии, столь значительные по размерам и амплитудам гравитационные минимумы (в эпицентре менее –3,5 мГл) могут быть вызваны лишь гранитами. Они имеют плотность 2,6 г/см³ и, соответственно, дефицит плотности в сравнении с регионально метаморфизованными породами 0,08 – 0,1 г/см³ [21]. От южного гравитационного минимума, обусловленного Константиновским гранитоидным массивом, наблюдаются линейные локальные минимумы, вытянутые в сторону месторождения.

Наиболее контрастной аномальной зоной в гравитационном поле проявлена Сухоложская анти-

клиналь, сложенная отложениями нижнеимняхской и верхне- и среднехомулхинской подсвит и выполняющая структурный контроль месторождения. В целом аномальная зона имеет практически стратиформный вид: изгибы изолиний наследуют изгибы слоев складки, углы между изолиниями аномалий и границами стратиграфических подразделений, выполняющих складку, выдержаны и невелики (рис. 1). Вместе с тем эта аномальная зона имеет сложное внутреннее строение.

В восточном блоке месторождения располагается отрицательная аномалия средних амплитуд ($-0,2 \dots -0,6$ мГл), достигая в экстремумах $-1,2$ мГл. Она охватывает преимущественно нижние пачки верхнехомулхинской подсвиты и проявлена в ядерной части антиклинали. Следуя на запад, ее сменяет аномалия повышенных значений Δg ($0,2-0,4$ мГл). Обе аномалии тесно сопряжены друг с другом. Положительная аномалия огибает отрицательную со стороны верхних пачек верхнехомулхинской подсвиты и большей своей частью смещена в замок Сухоложской антиклинали в центральном блоке месторождения. В замковой части на фоне повышенных значений Δg наблюдается более локальная, но самая интенсивная положительная аномалия неправильной формы, вытянутая в субширотном направлении. Величины приращений Δg в ее пределах достигают $0,8$ мГл. Область ее экстремумов тяготеет к осевой поверхности антиклинали, где сосредоточена наиболее интенсивная сульфидная и золоторудная минерализация (рис. 1, 2). Здесь

же нарушается стратиформный облик аномалий гравитационного поля, что выражается в значительном изменении направления изоаномал с субширотного на субмеридиональный вдоль системы разрывных нарушений, секущих сухоложскую антиклиналь. Снижение аномальных значений Δg в северном направлении согласуется с пологим погружением минерализованной зоны под отложения имняхской свиты. Форма этой локальной аномалии хорошо согласуется с контуром рудной залежи.

Целостность отрицательной аномалии на восточном фланге месторождения нарушается присутствием локальной изометричной положительной аномалии до $0,6$ мГл. Характерно, что она, как и аномалия от рудного тела, также тяготеет к замку антиклинали, но только уже на уровне среднехомулхинской подсвиты.

Электрические поля естественной поляризации и кажущихся удельных сопротивлений

Месторождение приурочено к зоне, выраженной в поле потенциалов естественной электрохимической поляризации (ЕП) региональной ступенью, разделяющей южную область с углеродистыми отложениями аунакитской свиты, характеризующимися аномальными отрицательными значениями от -600 до -400 мВ, с безаномальной северной областью распространения преимущественно карбонатных отложений имняхской свиты (рис. 3).

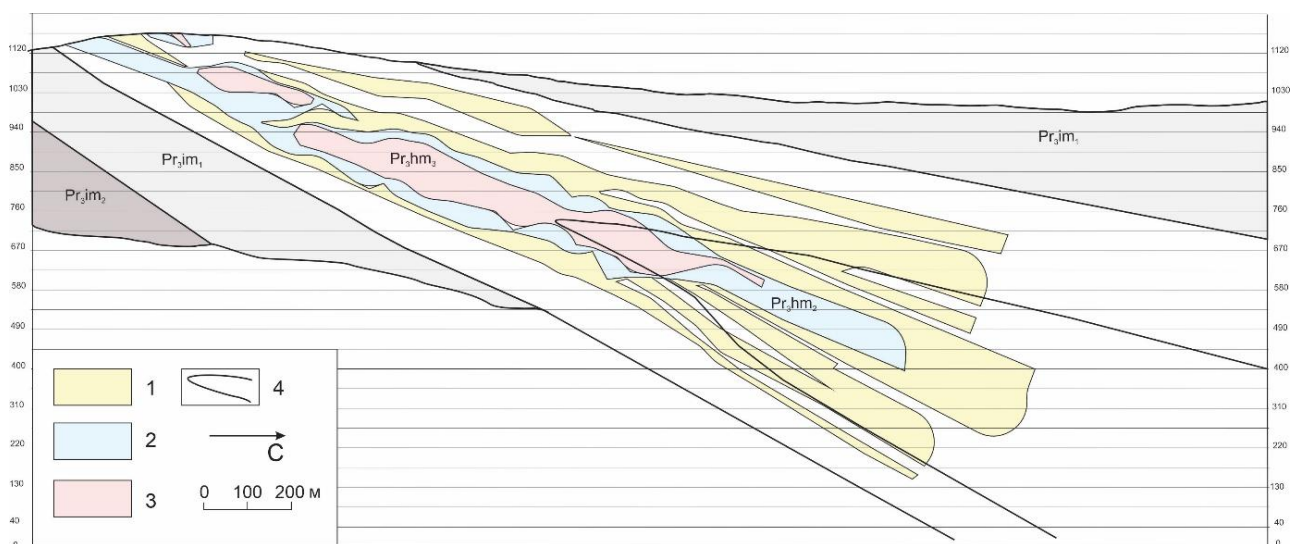


Рис. 2. Поперечный разрез вдоль буровой линии +9 (по материалам Карпенко И.А. и др., 2007): 1–3 – контуры рудных тел: 1 – убогих ($0,2-0,5$ г/т), 2 – бедных ($0,5-1,5$ г/т), 3 – богатых (от $1,5$ г/т); 4 – границы стратиграфических подразделений

Fig. 2. Cross-section along drilling line +9 (based on the materials of I.A. Karpenko et al., 2007): 1–3 – ore body contours: 1 – poor-grade ($0.2-0.5$ g/t), 2 – low-grade ($0.5-1.5$ g/t), 3 – high-grade (from 1.5 g/t); 4 – boundaries of geological units

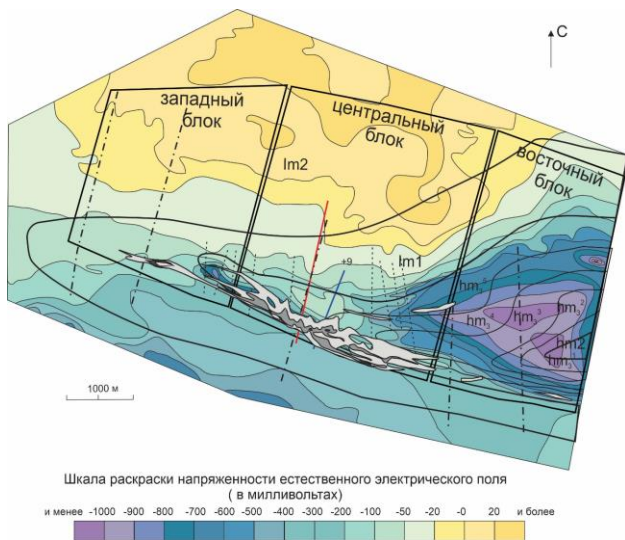


Рис. 3. Естественное электрическое поле месторождения Сухой Лог (Попов Н.П. и др., 1977): условные обозначения – из рис. 1

Fig. 3. Natural electric field of the Sukhoy Log deposit (N.P. Popov et al., 1977): legend as shown in Fig. 1

Геоэлектрохимическая обстановка самого месторождения, как и гравитационная, во многом обусловлена структурой Сухоложской антиклинали. В восточном блоке месторождения расположена аномалия, с отрицательными потенциалами до -1000 мВ. Она охватывает ядерную часть антиклинали, ее границы хорошо согласуются с границами хомолхинской свиты. В центральном блоке поляризуемость пород заметно нарушается, значения отрицательных потенциалов естественного электрического поля не превышают -100 мВ, хотя фрагмент поляризующихся пород сохраняется и здесь, они образуют высокоамплитудную линейную аномалию до -500 мВ.

Еще более выразительна согласованность структуры сухоложской антиклинали с аномалиями кажущихся сопротивлений: углеродистые отложения хомолхинской свиты и существенно карбонатные – имняжской – создают контрастные аномалии, повторяющие форму антиклинали, соответственно низких и высоких сопротивлений (рис. 4).

Имняжские отложения в целом и в частности – в пределах самой складки, там, где они не участвуют в строении рудных зон, характеризуются умеренной степенью петроэлектрической однородности. Их сопротивления меняются в сравнительно узком интервале от 2000 до 5000 Ом*м. На водоразделах они возрастают свыше 5000 Ом*м, а в долинах водотоков, наоборот, понижаются до 1000 Ом*м в связи с нарастающей мощностью рыхлых отложений.

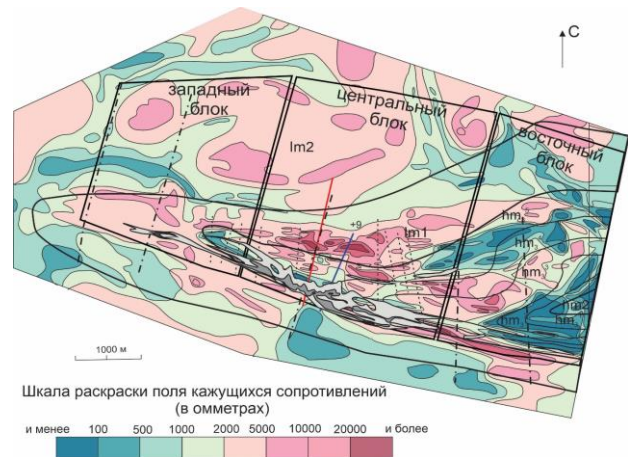


Рис. 4. Поле кажущихся сопротивлений месторождения Сухой Лог (Попов Н.П. и др., 1977): условные обозначения – из рис. 1

Fig. 4. Apparent resistivity field of the Sukhoy Log deposit (N.P. Popov et al., 1977): legend as shown in Fig. 1

Хомолхинские породы крайне неоднородны по УЭС. Отложения верхнехомолхинской подсвиты, наиболее широко распространенные на исследуемой площади, характеризуются наличием серии аномалий высоких и низких сопротивлений, проявленных в границах ее отдельных пачек и в разных блоках месторождения. Так, низкоомная аномалия от пятой пачки высокоуглеродистых сланцев (100 – 500 Ом), залегающая на границе с имняжскими породами, отчетливо оконтуривает смятые в складку хомолхинские отложения. Ее ширина вдоль лежачего и всячего контактов хомолхинской и имняжской свит значительно меняется в силу различных углов падения соответствующих крыльев складки и, соответственно, кажущихся мощностей пятой пачки.

Низкими сопротивлениями характеризуются также и сланцы первой и второй пачек подсвиты, формирующие характерные стратиформные аномалии на восточном фланге месторождения. В ядерной части антиклинали четвертая и третья пачки сильно дифференцированы по сопротивлениям при том, что наиболее крупные скопления высокоомных образований тяготеют к замкам антиклинали на уровне этих пачек, а более мелкие – к флексурам ее северного крыла. Отложения среднехомолхинской подсвиты, очень мало распространенные только в крайней восточной части месторождения, тоже характеризуются сравнительно высокими сопротивлениями.

В центральном блоке, в всячем крыле запрокинутой антиклинали, где на дневную поверхность проецируется основное рудное тело, выделяется аномально высокоомная область, нарушающая первоначальную картину распределения сопротивлений, в частности сопротивления пород пятой пачки, занимающей надрудное пространство, возрастают до значений от 5000 до 10000 Ом.

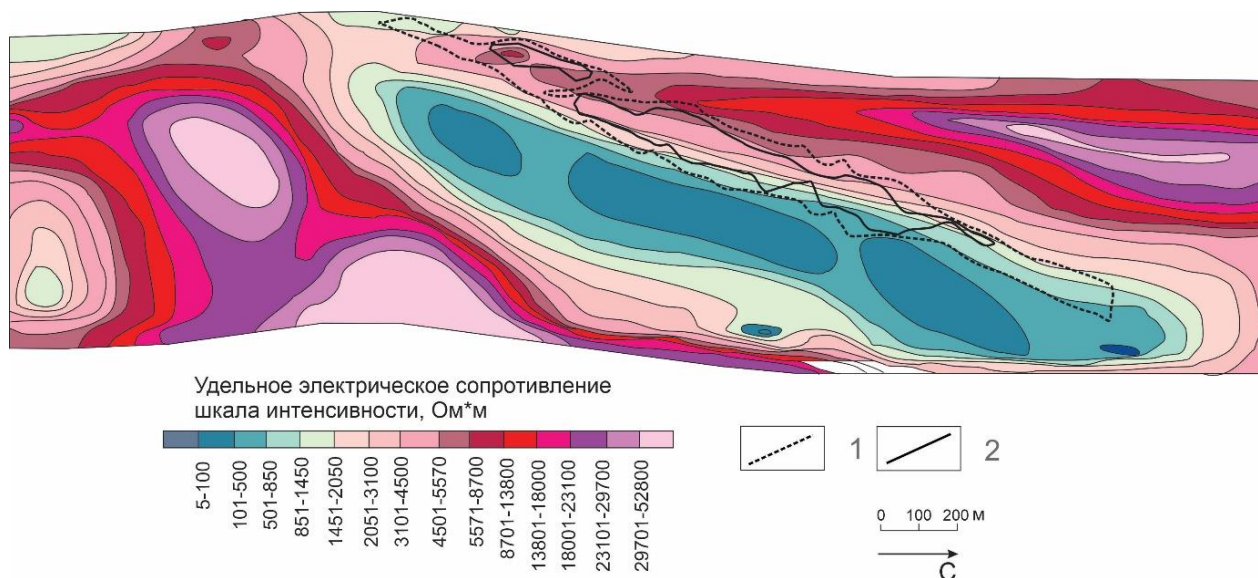


Рис. 5. Геоэлектрический разрез [22]: 1, 2 – контуры рудных тел: 1 – бедных, 2 – рядовых
Fig. 5. Geoelectric section [22]: 1, 2 – contours of ore bodies: 1 – low-grade ores, 2 – high-grade ores

Здесь же, в надрудном пространстве, повышаются сопротивления и имняхских пород до 10000–20000 Ом*м и более. Со стороны лежачего крыла в пятой пачке фрагментарно сохраняются такие же электрические свойства, как и в породах восточного блока: низкие сопротивления (100–500 Ом*м) и потенциалы электрохимической поляризации (~ –500 мВ), а также убогие руды, как и в динамосланцах восточного блока. Повышение сопротивления пород надрудного пространства характерно и для рудной зоны западного блока месторождения.

Для уточнения электрических характеристик рудной минерализованной зоны был проанализирован петроэлектрический разрез, построенный по результатам ГИС (рис. 5). Положение и геометрия рудного тела определялись по геологическому разрезу вдоль буровой линии +9 (рис. 2). Линия, вдоль которой построен разрез, и буровой профиль находятся друг от друга на расстоянии порядка 500 м. Наиболее богатые руды характеризуются сопротивлениями (от 1000 до 3000 Ом), представляющими собой переходный интервал между низкоомными и высокоомными участками.

Магнитное поле

При региональных исследованиях наблюдается контрастно-неоднородное проявление хомолхинской свиты в магнитном поле на самом месторождении, где происходит замыкание сухоложской антиклинали, и на удалении от него, где отложения хомолхинской свиты участвуют в строении крыльев сухоложской антиклинали и сопряженной с ней с севера синклинали складки (рис. 6). В крыльях складок хомолхинские отложения образуют линейные аномалии разной полярности: северное крыло синклинали –

положительную аномалию со значениями 50–150 нТл; южное (оно же северное для сухоложской антиклинали) – отрицательную аномалию со значениями от –200 до –500 нТл, а на отдельных участках – до –1000 нТл. В южном крыле сухоложской антиклинали хомолхинская свита вновь проявляется в положительной аномалии малой амплитуды до 100 нТл. Стратиформность аномалий на крыльях складчатых структур подчеркивается их шириной. Так, северное крыло синклинали в силу большего угла падения и, соответственно, меньшей кажущейся мощности характеризуется значительно более узкой аномалией, чем южное. Разнополярное проявление хомолхинской свиты на крыльях складок в магнитном поле свидетельствует о более раннем ее намагничении, сформировавшемся до складкообразования. Причем в целом его следует рассматривать как обратное (рис. 7). На самом месторождении намагниченность пород хомолхинской свиты резко сокращается, и в региональном масштабе его территорию в целом можно считать амагнитной.

Не меньший интерес представляет собой и физико-геологическая обстановка вблизи гранитного Константиновского массива. Осадочные отложения, расположенные непосредственно вблизи массива и над его скрытой частью, отчетливо прослеживаемой в гравитационном поле, претерпели контактовый метаморфизм [23]. Одним из результатов проявления контактовых изменений является развитие пирротина по пириту. Сочетание более древних аномалий от сложнорасположенных складчатых структур с наложенными аномалиями, связанными с контактовым метаморфизмом, привело к чрезвычайно неоднородному магнитному полю в окрестности Константиновского массива.

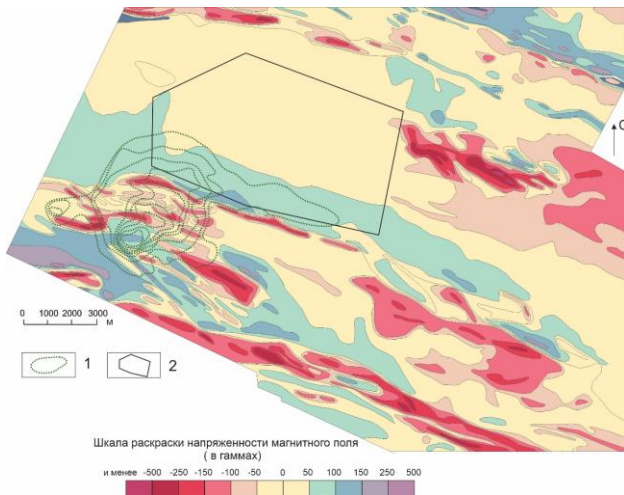


Рис. 6. Фрагмент регионального магнитного поля вблизи месторождения Сухой Лог (Попов Н.П. и др., 1977): 1 – контур гравитационных аномалий, создаваемых гранитоидами Константиновского массива; 2 – контур исследуемой территории месторождения Сухой Лог

Fig. 6. Fragment of the regional magnetic field near the Sukhoy Log deposit (N.P. Popov et al., 1977): 1 – contour of gravitational anomalies created by the granitoids of the Konstantinovsky massif; 2 – contour of the studied territory of the Sukhoy Log deposit

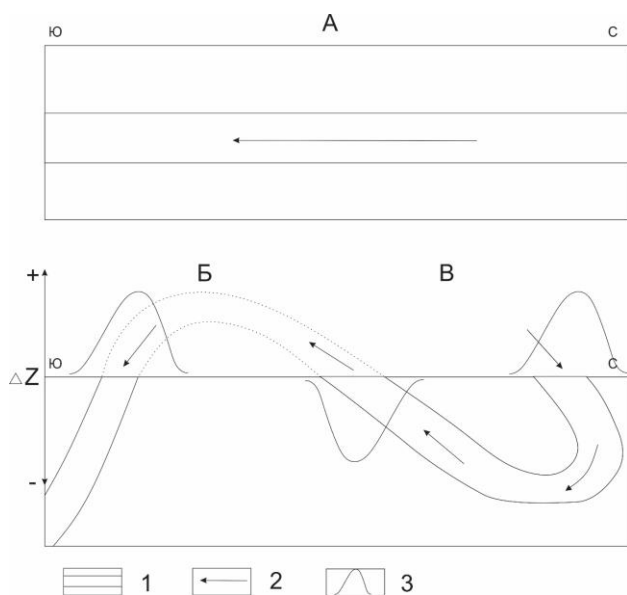


Рис. 7. Пояснение к образованию аномалий на крыльях складок: А – намагниченный пласт до деформации; Б, В – намагниченный пласт после деформации: Б – случай антиклинальной складки; В – случай синклинали складки; 1 – деформируемый пласт; 2 – направление намагниченности; 3 – формируемые аномалии

Fig. 7. Explanation of the formation of anomalies on fold limbs: А – magnetized layer before deformation; Б, С – magnetized layer after deformation: В – anticlinal fold case; С – synclinal fold case; 1 – deformable layer; 2 – direction of magnetization; 3 – formed anomalies

Сами граниты немагнитные и не образуют аномалий, что затрудняет диагностику полярности их намагничения, поэтому индикатором её направленности могут послужить магнитные контактово-измененные вмещающие породы. Наиболее отчетливо результат влияния контактового метаморфизма прослеживается в отложениях вачской свиты. В магнитном поле отложения вачской свиты за пределами ореола контактового метаморфизма имеют прямую намагниченность, она проявлена в положительных значениях порядка 100–250 гамм. В пределах контактового ореола намагниченность резко усиливается, а ее направление меняется на обратное (что указывает на обратную направленность магнитного поля на момент внедрения Константиновского массива).

Несмотря на то, что в региональном магнитном поле само месторождение Сухой Лог выглядит крайне безаномальным, при детальном исследовании неоднородность и информативность его магнитного поля значительно возрастает (рис. 8).

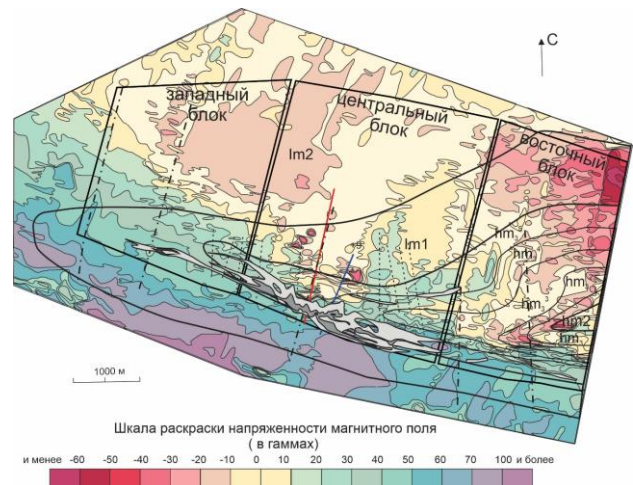


Рис. 8. Магнитное поле месторождения Сухой Лог (Попов Н.П. и др., 1977): условные обозначения – из рис. 1

Fig. 8. Magnetic field of the Sukhoy Log deposit (N.P. Popov et al., 1977): legend as shown in Fig. 1

Южный фланг месторождения характеризуется магнитным полем со значениями до 100 нТл. Наиболее вероятно, что данная аномалия создается отложениями нижнеаунакитской и верхнеимняхской подбит. В региональном магнитном поле они проявлены в виде стратиформных положительных слабоинтенсивных аномалий (+50; +100 гамм), фрагмент которых прослеживается вдоль южной границы исследуемого участка. Значения ΔZ затухают в северном направлении вплоть до нулевых. Северо-западная и северная части исследуемой территории немагнитны, значения ΔZ находятся в диапазоне от 0 до –10 гамм.

Северо-восточная часть территории характеризуется относительно крупной по размерам областью отрицательных значений ΔZ , достигающих в экстремумах -60 гамм. Эта область является крайним западным фрагментом региональной отрицательной магнитной аномалии от хомолхинских отложений в северном крыле сухоложской антиклинали. В ядерной части антиклинали на уровне первой пачки верхнехомолхинской подсвиты также наблюдается дипольная аномалия. И фрагмент региональной отрицательной аномалии, и дипольная аномалия свидетельствуют о том, что в восточном блоке месторождения сохранилась самая древняя обратная намагниченность, предшествующая складкообразованию. Дипольное проявление разных крыльев сухоложской антиклинали по мере приближения к центральному блоку месторождения сменяется на однополярное. И северное, и южное крылья на уровне 3, 4 и 5 пачек начинают создавать положительные аномалии, что, вероятно, связано с их перемагничиванием в условиях прямой полярности поля. В самом центральном геологическом блоке наблюдается очередная инверсия магнитного поля: наиболее интенсивно минерализованная зона осевой поверхности сухоложской антиклинали образует группу отрицательных субизометричных аномалий до -30 гамм. Здесь же отмечается нарушение структуры магнитного поля, выражающееся в резком изменении направления изолиний с субширотного на субмеридиональное.

Радиогеохимия

В строении месторождения и его ближайших окрестностей участвуют отложения хомолхинской и имняхской свит. Особенности составов пород в этих свитах – известковистых в имняхской и углеродистых сланцев в хомолхинской – являются главным фактором различия в распределении радиоактивных элементов (РАЭ) в них и очень выразительного их проявления в радиогеохимических полях (рис. 9–12).

На максимальном удалении от месторождения, в пределах площади аэрогеофизических исследований, на ее северном фланге, имеется участок пород имняхской свиты со сравнительно слабо дифференцированным распределением РАЭ без признаков эпигенетического обогащения, которое можно принять за изначальный радиогеохимический фон метаосадочных пород имняхской свиты (таблица). Известковистые отложения имняхской свиты при общем низком содержании РАЭ максимально обеднены К: Th/K отношение в них достигают самых высоких значений на всей площади исследования. Практически вдоль всей южной границы площади исследования в имняхских отложениях прослеживаются узкие дугообразные аномалии тория и калия. Аномалии располагаются на фронте гравитационного минимума, создаваемого скрытой частью Константиновского массива, и, вероятно, обусловлены контактовым воздействием гранитов на имняхские породы. Характерно резкое понижение Th/K отношения до 3–2,5 в пределах этих аномалий.

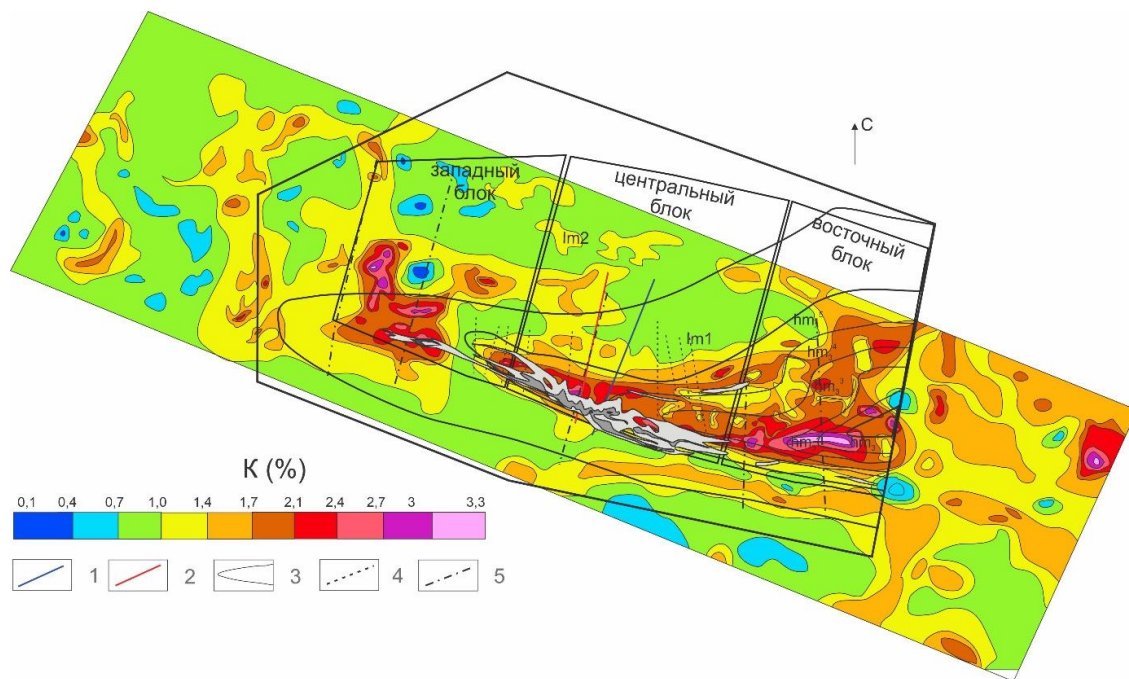


Рис. 9. Поле распределения калия месторождения Сухой Лог и его окрестностей (по материалам Керцман В.М., Мойланен Е.В.); условные обозначения – из рис. 1

Fig. 9. Potassium distribution of the Sukhoy Log deposit and surrounding areas (based on the materials of Kertsman V.M., Moilanen E.V.); legend as shown in Fig. 1

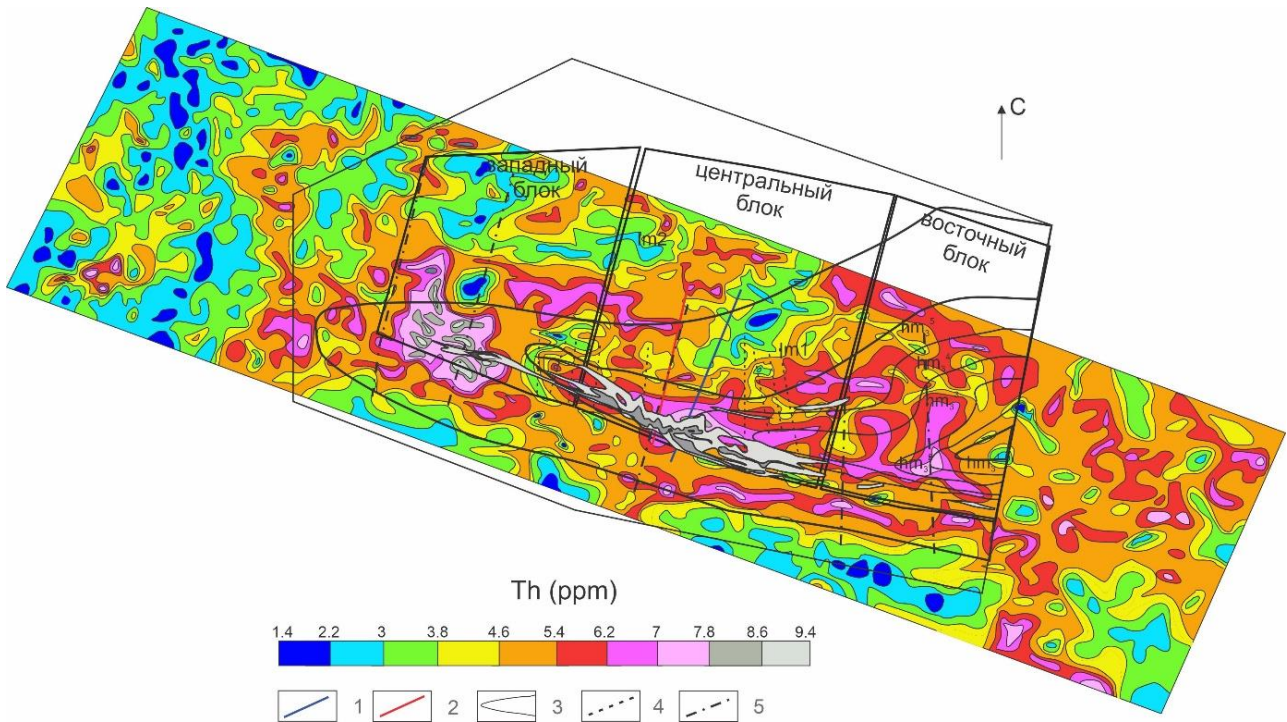


Рис. 10. Поле распределения тория месторождения Сухой Лог и его окрестностей (по материалам Керцман В.М., Мойланен Е.В.); условные обозначения – из рис. 1

Fig. 10. Thorium distribution of the Sukhoy Log deposit and surrounding areas (based on the materials of Kertsman V.M., Moilanen E.V.); legend as shown in Fig. 1

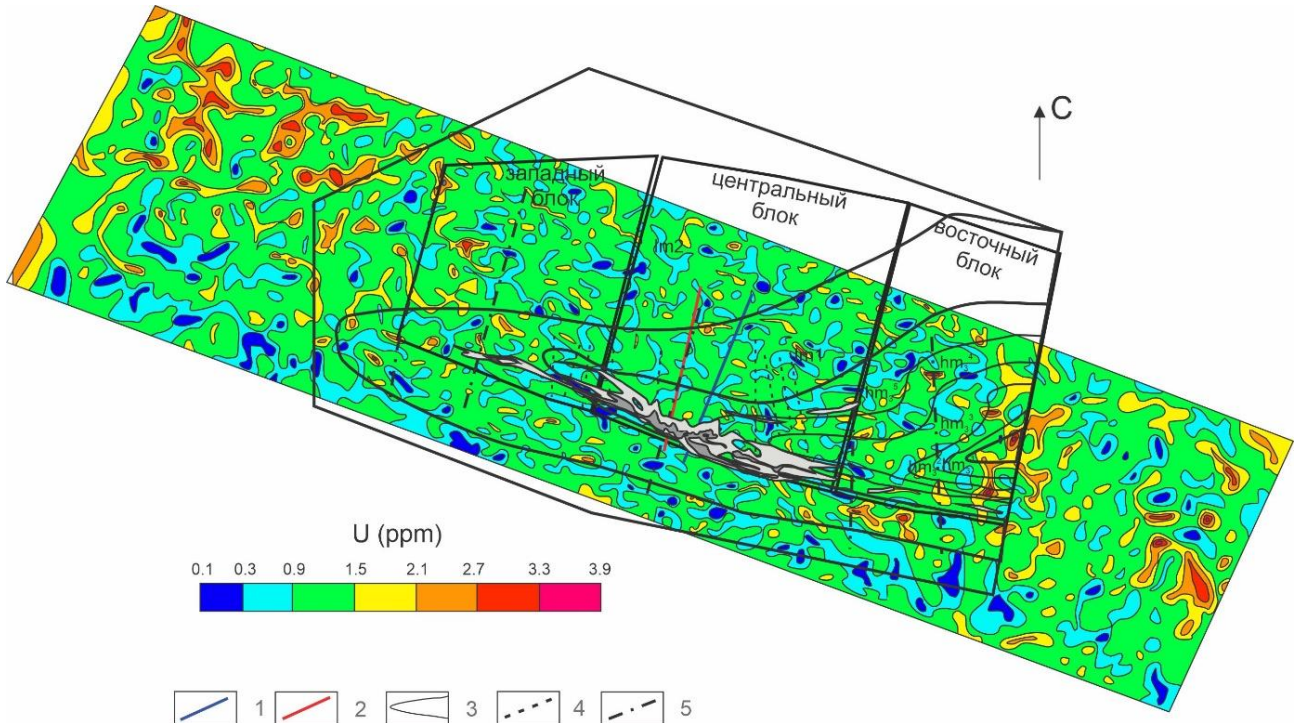


Рис. 11. Поле распределения урана месторождения Сухой Лог и его окрестностей (по материалам Керцман В.М., Мойланен Е.В.); условные обозначения – из рис. 1

Fig. 11. Uranium distribution of the Sukhoy Log deposit and surrounding areas (based on the materials of Kertsman V.M., Moilanen E.V.); legend as shown in Fig. 1

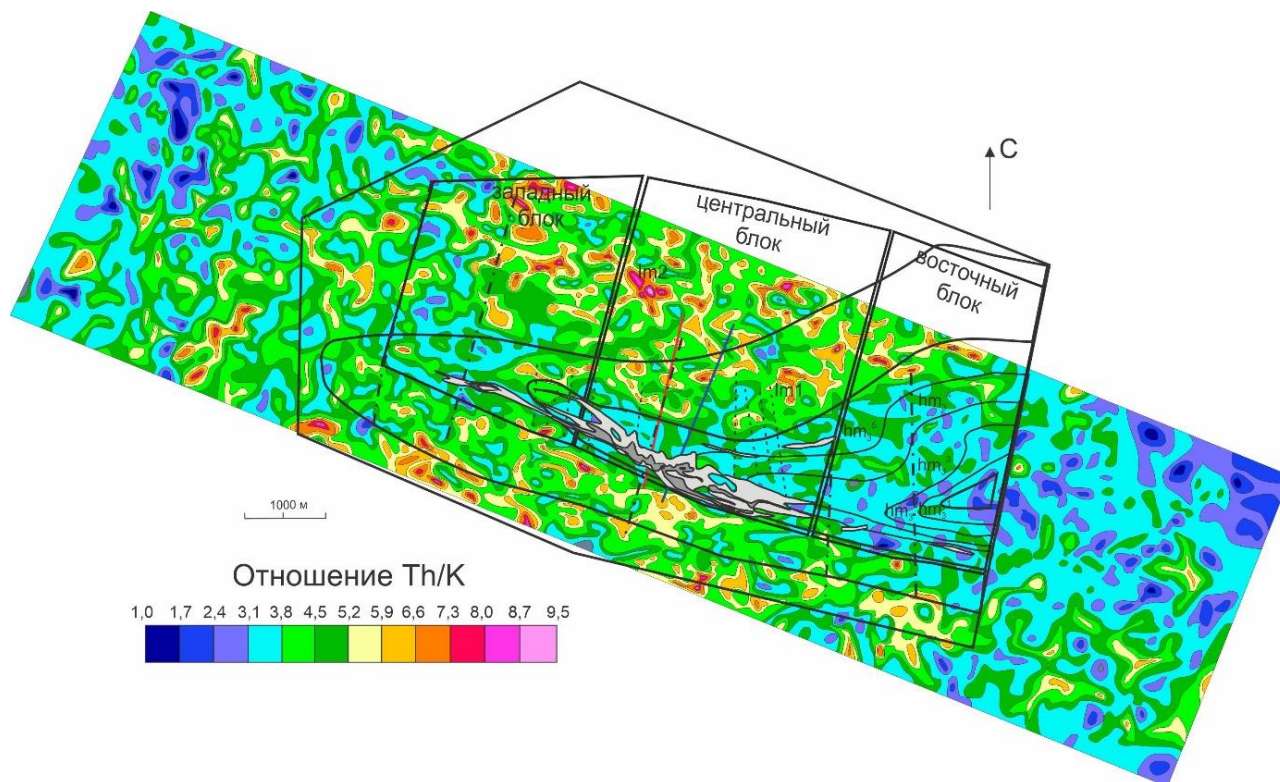


Рис. 12. Торий-калиевое отношение месторождения Сухой Лог и его окрестностей (по материалам Керцман В.М., Мойланен Е.В.); условные обозначения – из рис. 1

Fig. 12. Thorium-potassium ratio of the Sukhoy Log deposit and surrounding areas (based on the materials of Kertsman V.M., Moilanen E.V.); legend as shown in Fig. 1

Таблица. Распределение РАЭ в отложениях хомолхинской и имняхской свит

Table. Radioactive elements distribution in the Khomolkho and Imnyakh formations

Породы/Rocks		U, 10 ⁻⁴ %	Th, 10 ⁻⁴ %	K, %	Th/K, 10 ⁻⁴
Известковые метапесчаники и песчаные известняки имняхской свиты Calcareous metasandstones and sandy limestones of the Imnyakh formation	За пределами месторождения Outside the deposit	0,3–1,8 * 0,6	1,6–5,6 3,8	0,3–1,1 0,8	3,0–8,5 6,5
	В рудных зонах In ore zones	0,7–2,9 2,3	4,0–8,8 6,8	1,3–2,9 2,3	1,5–4,5 3,0
Углеродистые сланцы и метаалевролиты хомолхинской свиты Carbonaceous shales and metaaleurolites of the Khomolkho formation	За пределами месторождения Outside the deposit	0,5–3,1 1,7	3,2–6,4 5,0	1,3–2,1 1,8	1,5–4,0 2,0
	В рудных зонах In ore zones	0,5–2,7 1,3	4,4–8,6 7,0	1,5–3,1 2,4	1,5–5,0 3,0

Примечание/Note: *минимум–максимум; *minimum–maximum*;
 среднее значение; *average*

Сразу заметен значительно больший уровень накопления РАЭ в углеродистых сланцах хомолхинской свиты по сравнению с отложениями имняхской свиты, имеющими преимущественно известковый состав. Сменяется и радиогеохимическая специализация хомолхинских отложений – в целом они создают аномалию самых низких значений Th/K отношения, особенно контрастную на фоне этого параметра в имняхских породах. Также очевидно, что распределение РАЭ в породах обеих свит за пределами месторождения и нам нем самом сильно различаются (таблица). На месторождении содержания почти всех элементов сильно возрастают. Исключением является

распределение U в породах хомолхинской свиты, на месторождении, особенно в центральном и западном блоках, его содержания значительно ниже, чем за пределами месторождения.

Обогащенность имняхских отложений РАЭ на месторождении выразилась в уже упомянутых дугообразных аномалиях экзоконтакта Константиновского массива и очень интенсивных ореолах, создаваемых рудной зоной Западного блока. В ней в 2 раза увеличивается содержание Th и более чем в 3 раза – содержание K, что приводит к резкому уменьшению Th/K отношения по сравнению с исходными породами. Но, пожалуй, наиболее выра-

зительным радиогеохимическим признаком рудной зоны Западного блока являются интенсивные ореолы U, по сравнению с исходными породами содержание U в ней возрастает почти в 4 раза. Содержания U и K здесь становятся существенно больше их распространенности в верхней части континентальной коры, где они составляют соответственно 2,5 г/т и 2,5 % [24] или 2,5 г/т и 2,86 % [25], тогда как во вмещающих имняхских отложениях их содержания в разы меньше кларков.

Значительно сложнее на месторождении выглядит распределение РАЭ в породах хомолхинской свиты. На его крайнем восточном фланге ореолы максимального скопления Th и K при высокой корреляции между собой контролируются замковой частью антиклинали на уровне среднехомолхинской подсвиты и первой пачки – верхнехомолхинской, где их форма и размер очень хорошо согласуются со структурой дипольной магнитной аномалии. Отчетливо выражена калиевая направленность радиогеохимической характеристики пород: Th/K отношение в пределах этих ореолов достигает самых низких значений (до 1,5 и ниже) на всем месторождении. По мере приближения к центральному блоку наблюдается интенсивный ореол Th в северном крыле антиклинали на уровне 3, 4 и 5 пачек, там же, где в создаваемой этим крылом магнитной аномалии сменяется полярность с отрицательной на положительную, а в электрических полях заметно возрастают УЭС пород и разрушается их естественная электрохимическая поляризуемость. В отличие от восточного блока, где интенсивным ореолам Th соответствовали еще более интенсивные ореолы K, здесь, наоборот, хомолхинским породам свойственны самые низкие содержания K и самые высокие значения (до 5) Th/K отношения. Другой особенностью этого ореола Th является то, что у него ослабевает связь с пликативной тектоникой; в осуществлении его контроля возрастает значимость субмеридиональных разрывных нарушений, вдоль которых он проникает в имняхские отложения. В самом Центральном блоке, непосредственно над слепым рудным телом, структура радиогеохимических ореолов в еще большей мере становится зависимой от нарушений, ортогональных осевой поверхности антиклинали. Как и в отрицательной магнитной аномалии, создаваемой этим телом, направленность изолиний ореолов главным образом обусловлена дизъюнктивной тектоникой как в хомолхинских, так и в имняхских отложениях. Характерно, что в центральной рудной зоне в очередной раз происходит инверсия полярности магнитных аномалий, и изменение в соотношениях Th и K. Значения Th/K отношения здесь вновь понижаются (до 3), но не так сильно, как в Восточном блоке.

Заключение

Комплексный анализ геофизических и радиогеохимических полей позволяет утверждать, что их структура отражает длительное многоэтапное развитие месторождения Сухой Лог. Наиболее выразительно этапность образования месторождения и его аномальной обстановки выглядит в магнитном поле в связи со сменой полярности аномалий на различных этапах. По особенностям проявления верхнехомолхинских отложений северного крыла Сухоложской антиклинали в магнитном поле можно предположить, что в процессе развития месторождения не менее чем дважды менялась полярность магнитного поля, что позволило выделить три зоны с разновозрастными аномалиями. Обособленность этих зон также подтверждается различием их признаков и в других геофизических и радиогеохимических полях.

Особенностью наиболее ранних аномалий является стратиформный облик и высокая подчиненность различным структурным элементам Сухоложской антиклинали. Их формирование связывается с этапом дислокационного метаморфизма и с образованием самой антиклинали. На этом этапе только в отложениях хомолхинской свиты происходило формирование убогих руд с содержаниями до 0,5 г/т. Метаморфогенная аномальная обстановка сохранилась в Восточном блоке месторождения. Её характерные геофизические признаки:

- снижение общего магнитного фона верхнехомолхинских сланцев на месторождении по сравнению с фоном, создаваемым ими за пределами месторождения, при сохранности наиболее древней обратной намагниченности;
- петроплотностная дифференциация хомолхинских сланцев: тесная сопряженность зон разуплотнения пород в ядре антиклинали с зонами повышенной плотности пород на периферии и в замке складки;
- высокая естественная активность всех пород при хорошо выраженной их неоднородности по УЭС;
- аномально высокие содержания всех РАЭ при ярко выраженной калиевой специализации динамосланцев и самых низких на месторождении значений Th/K отношения.

Для второго и третьего этапов заметно ослабление связи аномалий с пликативной тектоникой и нарастающее влияние со стороны дизъюнктивных нарушений на размещение и структуру аномалий, что позволило предположить гидротермально-метасоматическую природу последних. Образования второго этапа и свойственные им признаки сохранились в приграничной зоне Восточного и Центрального блоков. Для них характерно перемагничивание в условиях прямой полярности поля с созданием

крайне малоинтенсивных аномалий. В сланцах верхнехомолхинской подсвиты возрастают УЭС и нарушается естественная электрическая поляризуемость, существенно снижаются содержания К при обогащении Th так, что преобразованным на этом этапе верхнехомолхинским сланцам свойственны самые высокие Th/K отношения. Это зона восточного окончания главного рудного тела. Здесь развиты большей частью убогие и бедные руды, в значительно меньшем количестве встречаются рядовые руды.

В сравнении с двумя предыдущими этапами, распространенность преобразований третьего этапа локальнее, но именно на участках его проявления окончательно сформировано в хомолхинских сланцах Центрального блока главное рудное тело и его основные запасы, и оруденение Западного блока в породах имняхской свиты. Третий этап протекал в эпоху очередной инверсии магнитного поля. В центральном блоке наиболее выразительные геофизические признаки свойственны интенсивно минерализованной зоне осевой поверхности антиклинали. Здесь отмечается значительное нарушение структуры гравитационного и магнитного полей, связанное с резким изменением направлений изолиний с субширотного на субмеридиональное вдоль разрывных нарушений. Хомолхинским отложениям, претерпевшим изменения на третьем этапе формирования месторождения, свойственны практически полное нарушение поляризуемости, высокие содержания калия и пониженные значения Th/K отношения, и крайне высокие сопротивления.

Оруденение Западного блока развито преимущественно в имняхских породах. В силу отсутствия в них углеродистого вещества информативность электрических методов в этой части рудного поля не так высока, но, как и в Центральном блоке, наблюдается повышение УЭС пород в надрудном пространстве, хотя и выраженное намного слабее. Для этого оруденения главными признаками являются радиогеохимические. Рудная зона отличается от вмещающих пород не только аномально высоким накоплением всех РАЭ, но и совершенно иным их распределением: Th/K отношения самые высокие во вмещающих

имняхских породах сменяются на очень низкие в рудной зоне. По этому показателю рудные зоны Западного и Центрального блоков похожи между собой. Отличаются они тем, что в западной рудной зоне значительно больший уровень накопления U, что хорошо согласуется и с занимаемой верхней позицией западного оруденения в стратиграфическом разрезе рудного поля, и с максимальной миграционной способностью U. Вероятно, что на третьем этапе наряду с приносом РАЭ в минералообразующую систему рудного поля имел место факт активного перераспределения U в ней – он выносился из рудной зоны на уровне хомолхинской свиты и накапливался на уровне оруденения имняхских пород. *В этой связи представляют прогнозный интерес интенсивные ореолы U среди имняхских отложений в северо-западном углу участка аэрогеофизических исследований. Существенно меньший уровень накопления Th и K, чем в западной рудной зоне, может свидетельствовать о наличии здесь оруденения, скрытого на глубине.*

Установлены косвенные геофизические признаки связи гидротермально-метасоматических преобразований третьего этапа с герцинским гранитоидным магматизмом Угаханского комплекса, представителем которого является Константиновский массив на южном фланге месторождения:

- обратная намагниченность рудной залежи и пирротинизированных сланцев экзоконтактной зоны массива;
- «вытянутые» гравитационные минимумы со стороны массива в направлении месторождения;
- ореолы высоких концентраций радиоактивных элементов на участках проявления третьего рудного этапа с пониженными значениями Th/K отношения, такими же, как и в экзоконтактной зоне гранитной интрузии.

Образование руд происходило на всех трех этапах, но их объем сильно возрастал, а качество улучшалось от этапа к этапу, особенно на участках развития гидротермально-метасоматических процессов третьего этапа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слоквенко В.В., Колмаков Ю.В. Золоторудное месторождение Сухой Лог (Патомское нагорье). Часть I. Постановка проблемы, геодинамическая обстановка и геологическое строение // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 157–174.
2. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia / V.V. Distler, M.A. Yudovskaya, G.L. Mitrofanov, V.Yu Prokof'ev, E.N. Lishnevsky // Ore Geology Reviews. – 2004. – Vol. 24 (1–2). – P. 7–44.
3. Этапы формирования крупномасштабной благороднометалльной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения / Н.П. Лавров, И.В. Чернышев, А.В. Чугаев, Е.Д. Бадилова // Доклады РАН. – 2007. – Т. 415 (2). – С. 236–241.
4. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb- изотопного SHRIMP-датирования аксессуарных минералов / М.А. Юдовская, В.В. Дистлер, Н.В. Родионов, А.В. Мохов, А.В. Антонов, С.А. Сергеев // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53 (1). – С. 32–64.
5. 40Ar-39Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) / A.V. Chugaev, A.E. Budyak, Yu.O. Larionova, I.V. Chernyshev, A.V. Travin, Yu.I. Tarasova,

- B.I. Gareev, G.I. Batalin, I.V. Rassokhina, T.I. Oleinikova // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – Vol. 144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>
6. Chugaev A.V. Orogenic gold deposits of Northern Transbaikalia, Russia: geology, age, sources, and genesis // *Geochem. Int.* – 2024. – Vol. 62. – P. 909–978. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702924700484>
 7. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia / S. Meffre, R.R. Large, R. Scott, J. Woodhead // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2008. – Vol. 72. – P. 2377–2391.
 8. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района / И.К. Рундквист, В.А. Бобров, Т.Н. Смирнова, М.Ю. Смирнов, М.Ю. Данилова, А.А. Ащеулов // *Геология рудных месторождений*. – 1992. – Т. 34 (6). – С. 3–15.
 9. Источники магм и этапы становления позднепалеозойских гранитоидов Западного Забайкалья / А.А. Цыганков, Д.И. Матуков, Н.Г. Бережная, А.Н. Ларионов, В.Ф. Посохов, Б.Ц. Цыренов, А.А. Хромов, С.А. Сергеев // *Геология и геофизика*. – 2007. – Т. 48 (1). – С. 156–180.
 10. Ерофеев Л.Я. Магнитное поле и природа аномалий на месторождениях золота. – Томск: Изд-во ТПИ, 1989. – 158 с.
 11. Irvine R.J., Smith M.J. Geophysical exploration for epithermal gold deposits // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1990. – Vol. 36 (1–3). – P. 375–412.
 12. El-Sadek M.A. Radiospectrometric and magnetic signatures of a gold mine in Egypt // *Journal of Applied Geophysics*. – 2009. – Vol. 67. – P. 34–43.
 13. Научные основы прогнозирования и поисков золотых и комплексных золото-платиноидных месторождений: прогнозно-поисковые комплексы / А.Ф. Коробейников, Ю.С. Ананьев, В.Г. Ворошилов, А.К. Мазуров, Г.Г. Номоконова, А.Я. Пшеничкин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – 253 с.
 14. Gold prospecting mapping in the Peninsular Malaysia Gold Belts / J.S. Kayode, M.H. Arifin, M.B.I. Basori, N.M.N. Mohd // *Pure Applied Geophysics*. – 2022. – Vol. 179. – P. 3295–3328.
 15. Mapping gold mineralization targets using geological field and magnetic ground data in the Yopa Area, Adamawa-Cameroon / Z.E.O. Maurice, M. Arsène, N.N.M. Moustapha, A.A. Zanga, D.H. Gouet // *Pure Applied Geophysics*. – 2023. – Vol. 180. – P. 2257–2273.
 16. Jahantigh M., Ramazi H. Integrating airborne geophysics data for geological mapping and porphyry mineralization prospectivity in the Shah-e-Babak Area, Southeastern Iran // *Pure Applied Geophysics*. – 2025. – Vol. 182. – P. 1637–1656.
 17. Geophysical signature of the Salobo IOCG deposit and implications for mineral exploration / M.C. Araújo, A.M. Silva, C.L.B. Toledo, D.S. Oliveira // *Journal of Applied Geophysics*. – 2025. – Vol. 239. – № 105753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105753>
 18. Колмаков Ю.В. Геолого-петрофизические характеристики месторождений золота в протерозойских углеродистых толщах Восточной Сибири как основа прогнозной интерпретации аэрогеофизических данных: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2021. – 272 с.
 19. Колмаков Ю.В., Сазонов А.М. Реконструкция петрофизической зональности золоторудного месторождения Благодатное в Енисейском кряже: геодинамический и физико-химический // *Литосфера*. – 2022. – Т. 22 (5). – С. 667–693.
 20. Геолого-генетическая интерпретация петрофизической неоднородности золото-сульфидного месторождения благодатное (Енисейский кряж) / Ю.В. Колмаков, А.М. Сазонов, А.Ф. Лазарев, А.Ю. Колмаков, В.Г. Федоров // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2024. – Т. 57 (1). – С. 82–94.
 21. Лишнеvский Э.Н., Дистлер В.В. Глубинное строение земной коры района золото-платинового месторождения Сухой Лог по геолого-геофизическим данным (Восточная Сибирь, Россия) // *Геология рудных месторождений*. – 2004. – Т. 46 (1). – С. 88–104.
 22. Керцман В.М., Мойланен Е.В., Подмогов Ю.Г. Применение аэрогеофизики в зоне Центрально-Африканского разлома, на золоторудных месторождениях в Иркутской области (Сухой Лог, Урях) и в Якутии // *Золото и технологии*. – 2020. – № 4 (50). – С. 74–80.
 23. Перевалов О.В., Срывцев Н.А. Геологическое строение и минерагения Бодайбинского и Мамского горнорудных районов. – М.: ГЕОКАРТ; ГЕОС, 2013. – 276 с.
 24. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // *Геохимия*. – 1962. – № 7. – С. 555–571.
 25. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // *Geochimica et cosmochimica acta*. – 1995. – Vol. 59 (7). – P. 1217–1232.

Информация об авторах

Юрий Викторович Колмаков, доктор геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; kolmakovyv@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2525-9214>

Владимир Валерьевич Слоквенко, аспирант, ассистент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; Vvs120@tpu.ru

Поступила в редакцию: 11.09.2025

Поступила после рецензирования: 25.09.2025

Принята к публикации: 06.10.2025

REFERENCES

1. Slokvenko V.V., Kolmakov Yu. V. Sukhoy Log gold ore deposit (Patom Highlands). Part I. Problem statement, geodynamic setting and geological structure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 157–174. (In Russ.)

2. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.Yu., Lishnevsky E.N. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geology Reviews*, 2004, vol. 24, no. 1–2, pp. 7–44.
3. Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Badirova E.D. Stages of formation of large-scale noble-metal mineralization of the Sukhoi Log deposit (Eastern Siberia): results of isotope-geochronological study. *Doklady of the Russian Academy of Science*, 2007, vol. 415, no. 2, pp. 236–241. (In Russ.)
4. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Relationship between metamorphism and ore formation at the Sukhoi Log gold deposit hosted in black slates from the data of UThPb isotopic SHRIMP dating of accessory minerals. *Geology of ore deposits*, 2011, vol. 53, Iss. 1, pp. 27–57.
5. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Yu.O., Chernyshev I.V., Travin A.V., Tarasova Yu.I., Gareev B.I., Batalin G.I., Rassokhina I.V., Oleinikova T.I. 40Ar-39Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104855>
6. Chugaev A.V. Orogenic gold deposits of Northern Transbaikalia, Russia: geology, age, sources, and genesis. *Geochem. Int.*, 2024, vol. 62, pp. 909–978. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702924700484>
7. Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2008, vol. 72, pp. 2377–2391.
8. Rundquist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N., Smirnov M.Y., Danilova M.Y., Ascheulov A.A. Stages of formation of the Bodaibo gold bearing district. *Geology of Ores. Deposits*, 1992, vol. 34, no. 6, pp. 3–15. (In Russ.)
9. Tsygankov A.A., Matukov D.I., Berezhnaya N.G., Larionov A.N., Posokhov V.F., Tsyrenov B.Ts., Khromov A.A., Sergeev S.A. Late Paleozoic granitoids of western Transbaikalia: magma sources and stages of formation. *Russian Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 1, pp. 120–140. (In Russ.)
10. Erofeev L.Ya. *Magnetic field and the nature of anomalies in gold deposits*. Tomsk, TPI Publ., 1989. 158 p. (In Russ.)
11. Irvine R.J., Smith M.J. Geophysical exploration for epithermal gold deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 1990, vol. 36, no. 1-3, pp. 375–412.
12. El-Sadek M.A. Radiospectrometric and magnetic signatures of a gold mine in Egypt. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, vol. 67, pp. 34–43.
13. Korobeinikov A.F., Ananyev Yu.S., Voroshilov V.G., Mazurov A.K., Nomokonova G.G., Pshenichkin A.Ya. *Scientific foundations for forecasting and searching for gold and complex gold-platinum deposits: forecasting and search complexes*. Tomsk, TPU Publ., 2015. 253 p. (In Russ.)
14. Kayode J.S., Arifin M.H., Basori M.B.I., Mohd N.M.N. Gold prospecting mapping in the Peninsular Malaysia Gold Belts. *Pure Applied Geophysics*, 2022, vol. 179, pp. 3295–3328.
15. Maurice Z.E.O., Arsène M., Moustapha N.N.M., Zanga A.A., Gouet D.H. Mapping gold mineralization targets using geological field and magnetic ground data in the Yopa Area, Adamawa-Cameroon. *Pure Applied Geophysics*, 2023, vol. 180, pp. 2257–2273.
16. Jahantigh M., Ramazi H. Integrating airborne geophysics data for geological mapping and porphyry mineralization prospectivity in the Shahr-e-Babak Area, Southeastern Iran. *Pure Applied Geophysics*, 2025, vol. 182, pp. 1637–1656.
17. Araújo M.C., Silva A.M., Toledo C.L.B., Oliveira D.S. Geophysical signature of the Salobo IOCG deposit and implications for mineral exploration. *Journal of Applied Geophysics*, 2025, vol. 239, no. 105753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105753>
18. Kolmakov Yu.V. *Geological and petrophysical characteristics of gold deposits in Proterozoic carbonaceous strata of East Siberia as a basis for predictive interpretation of airborne geophysical data*. Dr. Diss. Tomsk, 2021. 272 p. (In Russ.)
19. Kolmakov Yu.V., Sazonov A.M. Reconstruction of petrophysical zoning of the Blagodatnoye gold deposit in the Yenisei ridge: geodynamic and physical-chemical aspect. *Lithosphere*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 667–693. (In Russ.)
20. Kolmakov Yu.V., Sazonov A.M., Lazaref A.F., Kolmakov A.Yu., Fedorov V.G. Geological and genetic interpretation of the petrophysical heterogeneity of the Blagodatnoye gold-sulphide deposit (Yenisei ridge). *Geology and mineral resources of Siberia*, 2024, vol. 57, no. 1, pp. 82–94. (In Russ.)
21. Lishnevskiy E.N., Distler V.V. Crustal depth structure of the Sukhoi Log gold-platinum deposit area based on geological and geophysical data (Eastern Siberia, Russia). *Geology of ore deposits*, 2004, vol. 46, no. 1, pp. 88–104. (In Russ.)
22. Kertzman V.M., Moilanen E.V., Podmogov Yu.G. Application of aerogeophysics in the Central African Rift Zone, at gold deposits in the Irkutsk Region (Sukhoi Log, Uryakh) and in Yakutia. *Zoloto i Tekhnologii*, 2020, vol. 50, no. 4, pp. 74–80. (In Russ.)
23. Perevalov O.V., Sryvtsev N.A. *Geological structure and mineral genesis of the Bodaybinsky and Mamsky mining regions*. Moscow, GEOS Publ., 2013. 276 p. (In Russ.)
24. Vinogradov A.P. Average contents of chemical elements in the major types of terrestrial igneous rocks. *Geokhimiya*, 1962, vol. 7, pp. 555–571. (In Russ.)
25. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1995, vol. 59, no. 7, pp. 1217–1232.

Information about the authors

Yuri V. Kolmakov, Dr. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; kolmakovyv@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2525-9214>

Vladimir V. Slokvenko, Postgraduate Student, Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Vvs120@tpu.ru

Received: 11.09.2025

Revised: 25.09.2025

Accepted: 06.10.2025