

УДК 551.24.02:551.24.057
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4431
Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Геотектоническая модель глубинного строения Змеиногорского рудного района Рудного Алтая по данным геологической интерпретации комплекса геофизических съемок

А.С. Егоров, Д.Ф. Калинин, Д.Д. Секерина✉

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, г. Санкт-Петербург

✉ sekerinadar@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования глубинного строения Змеиногорского рудного района обусловлена поисками скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения в пределах рудноалтайской минерагенической зоны. Эта задача представляет особый прогностический интерес в связи с высокой опойскаванностью района на поверхности и перспективами обнаружения скрытого оруденения на более глубоких горизонтах. *Цель:* геотектоническое моделирование структурно-вещественных неоднородностей земной коры Змеиногорского рудного района на основе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных с выявлением закономерностей локализации скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения. *Объекты:* закономерности локализации скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения в пределах Змеиногорского рудного района Рудного Алтая. *Методы:* обработка площадных и профильных материалов изученности Рудного Алтая, качественная и количественная интерпретация разнородной геолого-геофизической информации на региональном и детальном уровнях. Изучение истории развития и геодинамических обстановок формирования рудоносных структур Змеиногорского рудного района с выявлением геолого-структурных прогностических признаков на глубинах, представляющих практический интерес. *Результаты.* На основе комплексного анализа разнородных геолого-геофизических данных выполнена историко-эволюционная и геодинамическая интерпретация минерагенических структур Змеиногорского рудного района в пределах Рудного Алтая; эти материалы могут быть положены в основу региональных прогнозных построений с использованием нестандартных геолого-структурных и вещественных (тектонических) признаков; верифицировано особое влияние тектонических событий, характеризующих обстановку активной континентальной окраины с осложняющими эпизодами рифтогенеза; выявлены закономерности локализации колчеданно-полиметаллических руд в вулканогенно-осадочных породах с обоснованием комплекса прогнозных критериев.

Ключевые слова: геофизические поля, геотектоническая модель, Змеиногорский рудный район Рудного Алтая, скрытое оруденение, полиметаллы

Для цитирования: Егоров А.С., Калинин Д.Ф., Секерина Д.Д. Геотектоническая модель глубинного строения Змеиногорского рудного района Рудного Алтая по данным геологической интерпретации комплекса геофизических съемок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 148–160. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4431

UDC 551.24.02:551.24.057
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4431

Geotectonic model of the deep structure of the Zmeinogorsky ore district of Rudny Altai according to geological interpretation of geophysical survey complex

A.S. Egorov, D.F. Kalinin, D.D. Sekerina✉

Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

✉ sekerinadar@mail.ru

Abstract. Relevance. The search for hidden and poorly manifested pyrite-polymetallic mineralization on the surface within the Rudny Altai minerogenic zone. This task is of particular prognostic interest due to the high searchability of the area on the surface and the prospects for detecting hidden mineralization at deeper horizons. **Aim.** Geotectonic modeling of structural and material inhomogeneities of the Earth's crust of the Zmeinogorsky ore district based on a comprehensive interpretation of geological and geophysical data with the identification of patterns of localization of hidden and poorly manifested pyrite-polymetallic mineralization on the surface. **Objects.** Regularities of localization of hidden and poorly manifested pyrite-polymetallic mineralization on the surface within the Zmeinogorsky ore district of the Rudny Altai. **Methods.** Processing of areal and profile materials of the study of the Rudny Altai, qualitative and quantitative interpretation of heterogeneous geological and geophysical information at the regional and detailed levels. The study of the history of development and geodynamic conditions of the formation of ore-bearing structures of the Zmeinogorsky ore district with the identification of geological and structural prognostic features at depths of practical interest. **Results.** Based on a comprehensive analysis of heterogeneous geological and geophysical data, the authors have carried out the historical-evolutionary and geodynamic interpretation of the mineragenic structures of the Zmeinogorsky ore district within the Rudny Altai; these materials can be used as the basis for regional forecast constructions using non-standard geological, structural and material (tectonic) signs; the special influence of tectonic events characterizing the situation of the active continental margin with complicating episodes of rifting was verified; the patterns of localization of pyrite-polymetallic ores in volcanogenic-sedimentary rocks were revealed with the justification of a set of predictive criteria.

Keywords: geophysical fields, geotectonic model, Zmeinogorsky ore district of the Rudny Altai, hidden mineralization, polymetals

For citation: Egorov A.S., Kalinin D.F., Sekerina D.D. Geotectonic model of the deep structure of the Zmeinogorsky ore district of Rudny Altai according to geological interpretation of geophysical survey complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 148–160. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4431

Введение

В условиях наращивания минерально-сырьевой базы за счет скрытого и слабо проявленного на поверхности колчеданно-полиметаллического оруденения Змеиногорский район Рудного Алтая представляет большой прогностический интерес [1]. Район обладает богатыми запасами объектов рассматриваемого типа, что предопределяет необходимость разработки глубинной геолого-структурной (геотектонической) модели формирования Змеиногорского рудного района, обеспечивающей оценку глубинного источника оруденения, механизмов мобилизации, переноса и локализации рудного вещества. Особое внимание уделяется тектонической позиции исследуемого региона в пределах каледонских и герцинских орогенных структур [2].

Для реализации этой задачи привлекается широкий комплекс разнородной геолого-геофизической информации. Согласно мировой классификации минерагенические объекты Алтайского региона относятся к категории вулканогенно-осадочных массивных сульфидных месторождений [3], именуемых в зарубежных источниках как «VMS-тип» [4, 5]. На основе изучения отечественного и зарубежного опыта [6] месторождений данного типа, говорится, что они формируются в условиях рифтогенеза и характеризуются бимодальными последовательностями вулканогенно-осадочных формаций [7].

Рассматривая закономерности формирования колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая, следует отметить их пространственно-генетическую связь с процессами рифто-

генеза ранне-среднедевонской активной континентальной окраины [8]. В ходе рифтогенного растяжения в раннем-среднем девоне была заложена Змеиногорско-Быструшинская вулканическая депрессия (прогиб), вмещающая рудные толщи [9]. Наиболее крупные месторождения приурочены к среднедевонским структурам задугового рифтогенеза, локализованным вблизи Северо-Восточного разлома. В позднем девоне-раннем карбоне депрессия попала во фланговую зону складчатонадвиговых дислокаций герцинского коллизийного орогенеза, обусловленного аккрецией Сибирской и Казахстанской плит. Это привело к существенной деформации этой вулканической депрессии. Пограничной структурой ареала развития герцинского орогенеза, проявившегося на фоне более древнего каледонского фундамента, ранее представлялся вышеупомянутый Северо-Восточный разлом [10, 11].

В последние десятилетия широко дискутируется вопрос о причинах многообразия полиметаллических руд Рудноалтайской минерагенической зоны [12]. По мнению многих авторов, высокая концентрация колчеданных руд и особенности морфологии рудных тел указывают на их образование в условиях восходящей ритмично-пульсационной гидротермальной системы с единым источником рудного вещества [13]. В ряде исследований авторы приходят к выводу о многоярусном расположении рудовмещающих горизонтов в пределах наиболее крупных месторождений Рудноалтайского пояса [14]. Таким образом, основная идея формирования колчеданно-полиметаллических руд

связана с наличием источника тепла, который запускает крупномасштабные конвекционные процессы в астеносфере и обеспечивает мобилизацию и перенос флюидов вдоль магматоподводящих глубинных разломов.

В большинстве источников процессы рудогенеза приурочены к вулканогенной депрессии, выполненной вулканогенно-осадочными породами. Интрузивные комплексы оказывают влияние на формирование зон потенциальной локализации скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения [15].

Дискуссионность механизмов рудоформирования Змеиногорского рудного района Рудного Алтая предопределяет необходимость исследования глубинного строения региона с углубленной геотектонической интерпретацией разнородных геолого-геофизических материалов. Для этого нами была поставлена задача систематизации разрозненных геолого-геофизических данных, их последующая обработка и комплексная интерпретация. В ходе этих исследований выполнено геолого-геофизическое моделирование рудного района, проведена оценка вещественных и морфологических параметров главных структурно-вещественных подразделений, намечены механизмы рудоформирования колчеданно-полиметаллических месторождений [16], которые в дальнейшем будут использованы для обоснования геолого-структурных критериев скрытого и слабопроявленного на поверхности колче-

данно-полиметаллического оруденения и выполнения прогнозно-минерагенических построений с использованием алгоритмов распознавания образов.

Фактологическая основа

В качестве фактологической основы исследования авторами задействованы геологические, тектонические, дистанционные карты и цифровые матрицы гравитационного и магнитного полей в масштабах 1:1000000–1:25000 [15]. Профильные материалы представлены региональными данными глубинного сейсмического зондирования и крупномасштабными сейсмическими разрезами МОГТ-2Д Змеиногорского рудного района [8]. Результаты предшествующих исследований данного района представлены в производственных отчетах и научных публикациях [17]. Ранее выполненные авторами мелкомасштабные геолого-геофизические построения этого региона задействованы для оценки последовательности проявления тектонических событий, определивших особенности локализации оруденения Змеиногорского рудного района [2].

Методология исследования

Технологическая схема геолого-геофизического моделирования Змеиногорского рудного района представлена на рис. 1. Она включает четыре основных этапа: создание базы данных, обработку, интерпретацию и решение прогнозных задач.

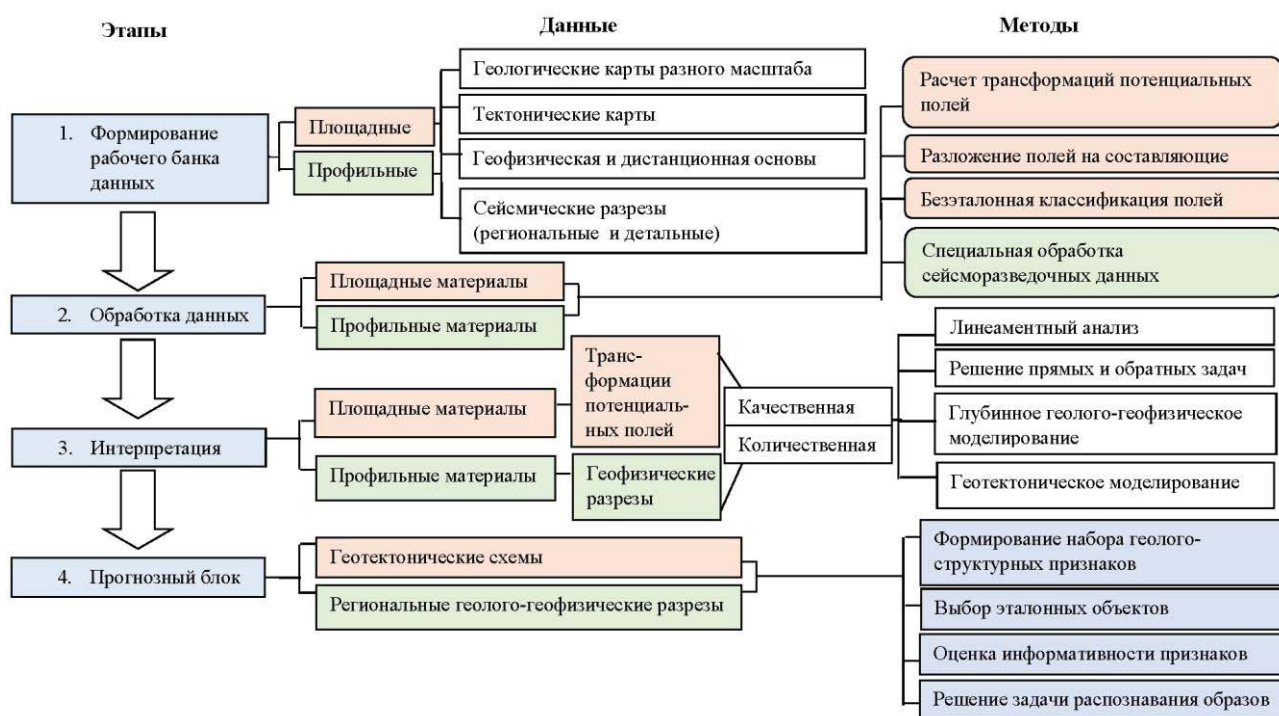


Рис. 1. Этапы обработки и интерпретации разнородных геолого-геофизических данных в пределах Змеиногорского рудного района (Рудный Алтай) [составлено авторами]

Fig. 1. Stages of processing and interpretation of heterogeneous geological and geophysical data within the Zmeinogorsk ore district (Rudny Altai) [compiled by the authors]

Формирование рабочего банка данных

На первом этапе выполняется систематизация разрозненной геолого-геофизической информации в составе рабочего банка данных (БД). В ходе его формирования проводится согласование условных обозначений и координатная привязка геологических и геофизических данных, как по площади рудного района, так и в сечениях опорных геофизических профилей.

Обработка данных

На втором этапе исследований выполнена обработка данных площадных и профильных геофизических съемок:

- расчет трансформант потенциальных полей (производные полей, искусственный псевдорельеф, высоко- и низкочастотная фильтрация и т. д.) [18, 19];
- разложение полей на локальную и региональную составляющие с использованием спектрального разложения на основе рядов Фурье [20] (рис. 2);
- безэталонная классификация исходных и преобразованных данных с использованием алгоритмов комплексной обработки, реализованных в отечественном программном обеспечении КОСКАД 3D [21] и др.

При обработке профильных сейсмических данных задействован алгоритм расчета сейсмического разреза в показателях «рефлективности» (рис. 3, а, б) [23, 24]. В скользящем окне по растровым представлениям глубинных и временных сейсмических разрезов ГСЗ и МОГТ-2Д-ВРС рассчитывается число меток сейсмических границ (или рефлекторов разрезов МОВ); результаты расчетов представляются в форме изолиний [8]. В общем случае на таких моделях удастся наметить положение блоков с корой континентального типа и межблоковых (сутурных) зон [25, 26].

Интерпретация данных

Геотектоническая интерпретация комплекса геолого-геофизических и дистанционных данных является важнейшим результатом исследований глубинного строения Змеиногорского рудного района (рис. 4).

При построении результирующей геотектонической схемы нами выделены разрывные нарушения, дифференцируемые по рангу и морфокинематическому типу, а также контуры основных структурно-вещественных подразделений площади исследований, включая раннедевонские шельфовые комплексы, рифтогенные интрузивные и эффузивные комплексы разного состава, а также молодые постколлизийные интрузивы.

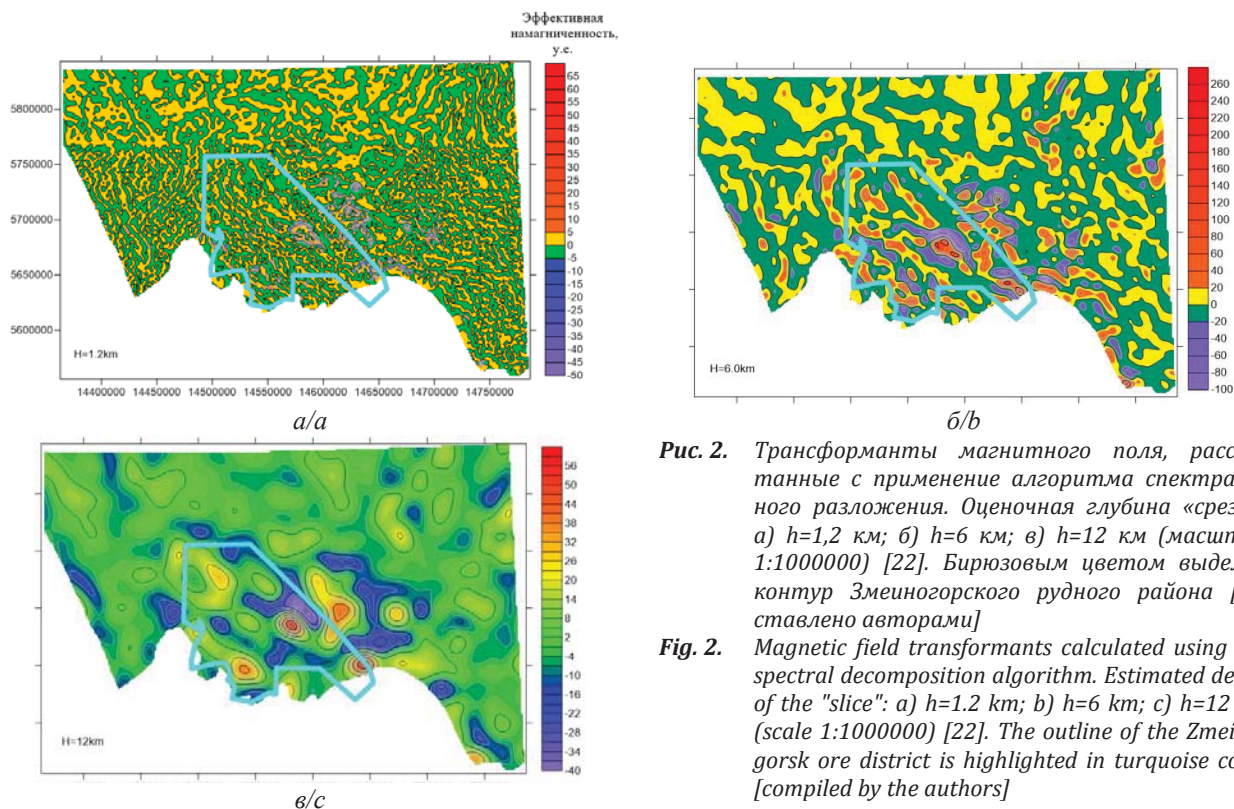


Рис. 2. Трансформанты магнитного поля, рассчитанные с применением алгоритма спектрального разложения. Оценочная глубина «среза»: а) $h=1,2$ км; б) $h=6$ км; в) $h=12$ км (масштаб 1:1000000) [22]. Бирюзовым цветом выделен контур Змеиногорского рудного района [составлено авторами]

Fig. 2. Magnetic field transformants calculated using the spectral decomposition algorithm. Estimated depth of the "slice": а) $h=1.2$ km; б) $h=6$ km; в) $h=12$ km (scale 1:1000000) [22]. The outline of the Zmeinogorsk ore district is highlighted in turquoise color [compiled by the authors]

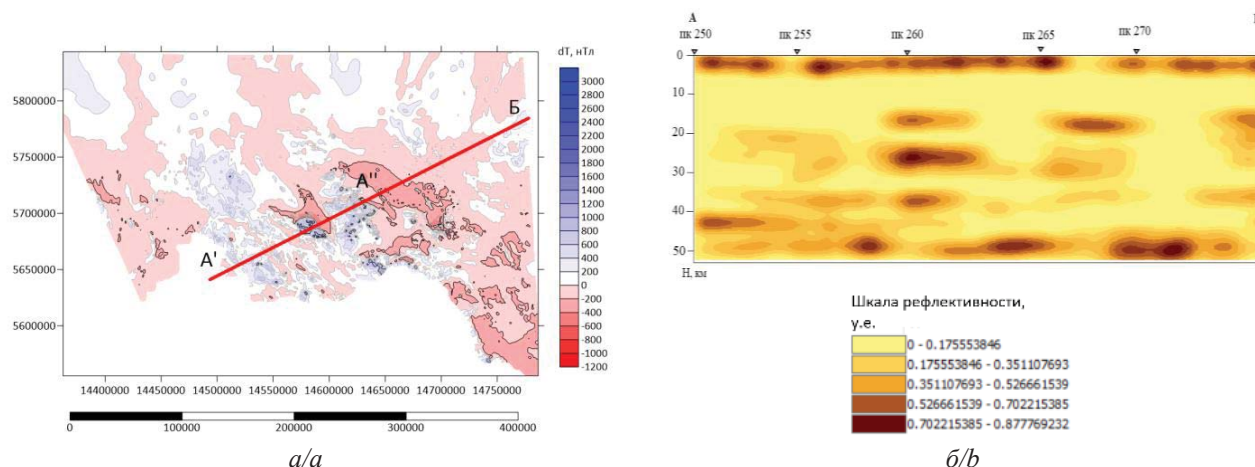


Рис. 3. Положение фрагмента регионального профиля ГСЗ-МОВЗ «Базальт» [27] на карте магнитного поля (а) и сейсмический разрез в показателях «рефлексивности» по данному фрагменту профиля (б) [составлено авторами]

Fig. 3. Position of the fragment of the regional GSZ-MOVZ "Basalt" profile [27] on the magnetic field map (a) and the seismic section in the "reflexivity" indices for this profile fragment (b) [compiled by the authors]

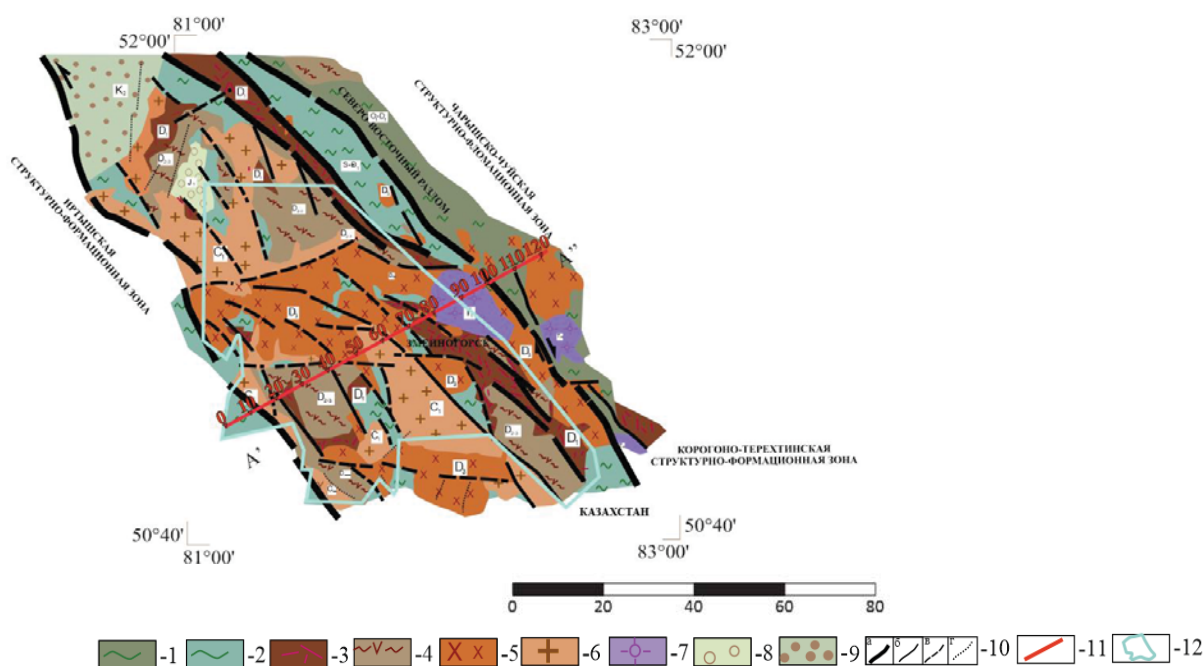


Рис. 4. Тектоническая схема Змеиногорского рудного района [составлено авторами]. Условные обозначения: 1–9 – структурно-вещественные подразделения (формации): 1 – флишеидная (1 – терригенно-карбонатные осадки (O_1-D_1), 2 – флиш ($S-D_{1-2}$)); 3 – бимодальная базальт-дацит-риолитовая (D_1), габбро-плагиогранитовая; 4 – базальт-дацит-риолитовая (D_{2-3}); 5 – габбро-гранодиорит-гранитовая (D_3); 6 – габбро-гранодиорит-гранитовая (C_1); 7 – плюмазит-гранитовая (T_1); 8 – моласса (J_1); 9 – образования платформенного чехла (K_2); 10 – разрывные нарушения: а – главные (внешние тектонические границы), б – второстепенные, выделяемые менее уверенно, в – второстепенные, выделяемые менее уверенно, г – прочие дислокации; 11 – интерпретационный профиль; 12 – контур Змеиногорского рудного района

Fig. 4. Tectonic scheme of the Zmeinogorsk ore district [compiled by the authors]. Legend: 1–9 – structural and material subdivisions (formations): 1 – flyschoid (1 – terrigenous-carbonate sediments (O_1-D_1), 2 – flysch ($S-D_{1-2}$)); 3 – bimodal basalt-dacite-rhyolite (D_1), gabbro-plagiogranite; 4 – basalt-dacite-rhyolite (D_{2-3}); 5 – gabbro-granodiorite-granite (D_3); 6 – gabbro-granodiorite-granite (C_1); 7 – plumbazite-granite (T_1); 8 – molasse (J_1); 9 – formations of the platform cover (K_2); 10 – discontinuities: а – main (external tectonic boundaries), б – secondary, allocated confidently, в – secondary, allocated less confidently, г – other dislocations; 11 – interpretation profile; 12 – outline of the Zmeinogorsk ore district

На схеме показано, что контуры исследуемого рудного района располагаются в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба. Согласно результатам качественной интерпретации потенциальных полей и их трансформант и с учетом данных геологического картирования в пределах рассматриваемой площади выделяются рифтогенные дислокации, предположительно, раннедевонского заложения и более поздние надвиговые деформации (D_3 – C_1), искажающие структурный план этого рифтогенного грабена.

Рифтогенные структуры имеют линейную морфологию и ориентированы в северо-западном направлении; надвиговые деформации имеют криволинейную морфологию и сходную ориентацию в геологическом пространстве.

Сложный характер наложения этих главных типов деформаций определяет зональный характер строения прогиба. На геотектонической схеме нами выделяются три основные структурные зоны, различающиеся уровнем денудации и мощностью вулканогенно-осадочных толщ.

Западный и центральный фланги этой структуры (I и II зоны) характеризуются интенсивным проявлением дугообразных разломов общего северо-западного простирания, предположительно, надвиговой кинематики и секущих линейных дислокаций субширотного-северо-восточного простирания (предположительно, сдвиговой природы). При этом в пределах западного фланга (I) на дневной поверхности картируются девонские (D_{1-2}) рифтогенные комплексы, что указывает на относительно умеренный уровень денудации осадочно-вулканогенных образований этой зоны. В центральной (II) зоне на дневную поверхность выведены наиболее древние шельфовые осадки прогиба (S – D_{1-2}), указывающие на значительное воздымание и высокий уровень денудации девонских рифтогенных толщ, вмещающих оруденение. Во-

сточный фланг (III зона) практически не деформирован герцинскими складчато-надвиговыми дислокациями, вследствие чего здесь можно ожидать высокую сохранность рифтогенных толщ.

Обобщенный глубинный геолого-геофизический разрез прогиба построен по фрагменту профиля ГСЗ-МОВЗ «Базальт» на основе интерпретации комплекса геологических и геофизических данных, включая результаты инверсии гравитационного, магнитного полей. В соответствии с этими материалами на разрезе представлены границы радиальной расслоенности кристаллической коры и отдельные границы в разрезе вулканогенно-осадочных образований, а также разрывные нарушения [2].

Следует отметить высокую информативность результатов решения обратных задач вдоль регионального профиля (рис. 5), полученных с использованием методики И.Б. Мовчана [20, 21]. Этот псевдоплотностной разрез показывает воздымание более плотных образований фундамента в центральной части прогиба (зона II) при увеличении мощности вулканогенно-осадочных толщ относительно пониженной плотности на его флангах (зоны I и III).

Дополнительно выполнен расчет особых точек аналитической функции, аппроксимирующей элементы гравитационного поля методом деконволюции Эйлера с использованием алгоритмов М.Б. Штокаленко [28–30]. По характеру пространственного положения особых точек нами выполнено трассирование границ распространения вулканогенно-осадочных формаций Змеиногорско-Быструшинского прогиба на фоне кристаллического фундамента.

С использованием алгоритма М.Б. Штокаленко [29] вдоль представительного сечения построены псевдоплотностной разрез (рис. 6, а) и разрез эффективной намагниченности (рис. 6, б).

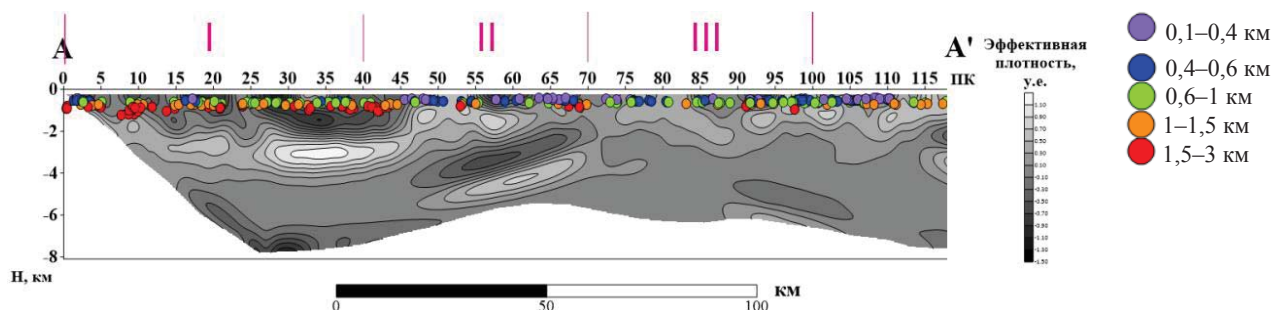
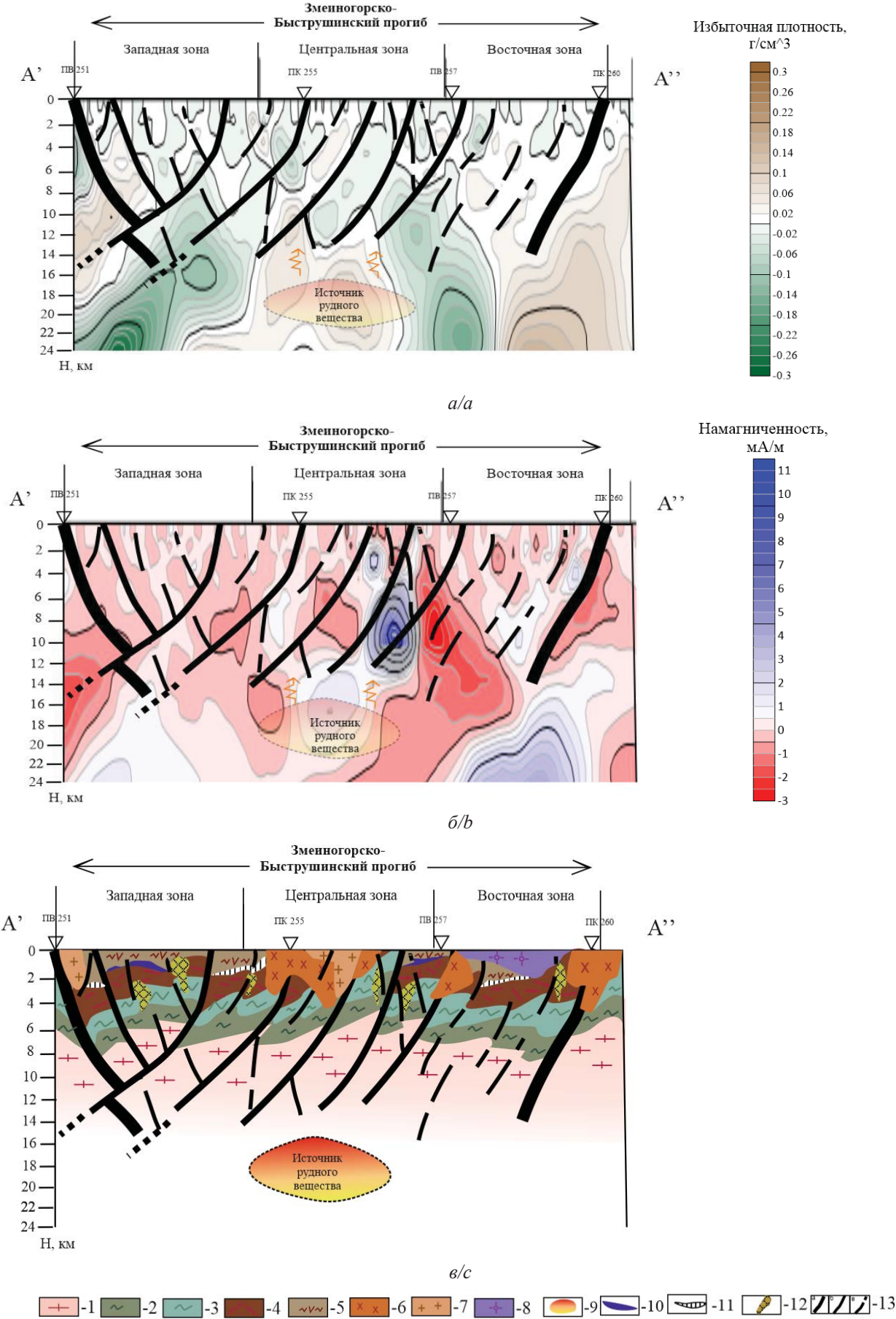


Рис. 5. Псевдоплотностной разрез по фрагменту регионального профиля ГСЗ-МОВЗ «Базальт» [20, 21] с наложением результатов расчета особых точек (деконволюция Эйлера) [составлено авторами]

Fig. 5. Pseudo-density section on a fragment of the regional profile of the GSZ-MOVZ "Basalt" [20, 21] with the superimposition of the results of the calculation of singular points (Euler deconvolution) [compiled by the authors]



Эти разрезы использованы в качестве основы для построения геолого-геофизического разреза Змеиногорско-Быструшинского прогиба с моделированием рифтогенных и надвиговых дислокаций, определяющих особенности строения прогиба (рис. 6, в). На разрезе нашли отображение особенности строения основных вулканогенных, осадочных и кристаллических образований, обусловленные последовательным проявлением рифтогенных и надвиговых дислокаций. На эту геолого-структурную основу нами вынесено предполагаемое расположение ареалов развития рудных формаций скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения.

На псевдоплотностном разрезе (рис. 6, а) Змеиногорско-Быструшинский прогиб проявляется как область знакопеременных эффективных плотностей, которая ограничивается с флангов ареалами повышенной плотности. В центральной части разреза на глубине 15–20 км выделяется контрастная зона разуплотнения, которая интерпретируется нами как ареал древнего магматического очага. С последним могут быть связаны инъекции мантийного вещества и формирование девонских вулканогенно-осадочных формаций.

Анализ разреза эффективной намагниченности (рис. 6, б) также позволяет наметить положение аномального контура на глубинных уровнях центральной зоны, который совпадает с «источником магматического вещества», выделенным нами на псевдоплотностном разрезе. Рифтогенные тектонические деформации растяжения проявляются как

границы субвертикальных градиентных зон. Надвиговые деформации восточной вергентности на псевдоплотностном и псевдомагнитном разрезах картируются по локальным градиентным зонам, а также по смене инфраструктуры поля.

Согласно выполненным построениям, надвиговые деформации в пределах Змеиногорско-Быструшинского прогиба имеют строгую продольную зональность. При этом западный фланг прогиба относительно слабо затронут надвиговыми деформациями; в центральной зоне герцинские надвиговые деформации имеют наиболее высокие амплитуды перемещений, и здесь отмечается значительное вздымание образований кристаллического фундамента и шельфовых осадков дорифтогенной стадии развития (О-S) с их экспонированием на дневной поверхности; восточный фланг относительно слабо затронут надвиговыми деформациями, из-за чего здесь можно ожидать максимальную сохранность рифтогенных комплексов.

Эта картина находит объяснение в последовательном проявлении позднекаледонских процессов активной континентальной окраины, которые привели к заложению Змеиногорско-Быструшинского рифтогенного прогиба. В ходе герцинской эпохи тектоногенеза коллизионный орогенез проявился здесь в форме складчато-надвиговых деформаций [2]. С рифтогенной стадией мы связываем миграцию рудных растворов вдоль глубинных швов исследуемого грабена; коллизионный орогенез оказал влияние на локализацию рудовмещающих толщ.

Рис. 6. Проявление разрывных нарушений а) на псевдоплотностном разрезе, построенном по методу М.Б. Штокаленко [29]; б) на разрезе эффективной намагниченности, построенной тем же методом; в) интерпретационный геолого-геофизический разрез верхней коры [составлено авторами]. Условные обозначения: 1–8 – структурно-вещественные подразделения: 1 – гранито-гнейсовый слой верхней коры; 2, 3 – осадочные формации древнего шельфа (2 – терригенно-карбонатная (О-S), 3 – флишодная (S-D₁₋₂); 4 – бимодальная базальт-риолитовая, риолит-риодацитовая и габбро-плагиогранитовая серия (D₁₋₂); 5 – вулканогенно-осадочные отложения базальт-дацит-риолитовой серии (D₂₋₃); 6 – габбро-гранодиоритовая формация (D₃); 7 – габбро-гранодиорит-гранитовая формация (C₁); 8 – плюмазитгранитовая формация (T₁); 9 – предполагаемый источник рудного вещества; 10–12 – рудные формации (10 – сплошные колчеданно-полиметаллические руды, 11 – прожилково-вкрапленные, 12 – субвулканические порфировые тела с гнездово-вкрапленным оруденением); 13 – разрывные нарушения (а, б – рифтогенные (а – главные, б – второстепенные), в – надвиговые, обусловленные, предположительно, герцинскими орогенезом)

Fig. 6. Manifestation of discontinuities a) on the pseudodensity section constructed by the method of M.B. Shtokalenko [29]; b) on the section of effective magnetization constructed by the same method; c) interpretive geological and geophysical section of the upper crust [compiled by the authors]. Legend: 1–8 – structural and material subdivisions: 1 – granite-gneiss layer of the upper crust; 2–3 – sedimentary formations of the ancient shelf (2 – terrigenous-carbonate (O-S), 3 – flyschoid (S-D₁₋₂); 4 – bimodal basalt-rhyolite, rhyolite-rhyodacite and gabbro-plagiogranite series (D₁₋₂); 5 – volcanogenic-sedimentary deposits of basalt-dacite-rhyolite series (D₂₋₃); 6 – gabbro-granodiorite formation (D₃); 7 – gabbro-granodiorite-granite formation (C₁); 8 – plumbazite-granite formation (T₁); 9 – supposed source of ore substance; 10–12 – ore formations (10 – solid cupreous-polymetallic ores, 11 – vein-embedded, 12 – subvolcanic porphyry bodies with nested-embedded mineralization); 13 – discontinuities (a, б – riftogenic (a – main, б – secondary), в – thrust faults, presumably caused by the Hercynian orogeny)

В пределах рудного района выделяется несколько типов оруденения:

- *сплошные колчеданно-полиметаллические руды*, которым характерны куполообразные формы, локализующиеся над выходами газогидротермальных растворов;
- *прожилково-вкрапленные руды*, указывающие на гидротермально-метасоматические механизмы образования;
- *субвулканические порфировые тела с гнездово-вкрапленным оруденением*, характеризующие наличие ингредиентов глубинного очага в процессе формирования рудных тел.

Однако при изучении закономерностей локализации рудных объектов должен учитываться и более поздний герцинский орогенез, обусловленный сближением и столкновением Сибирского и Казахстанского палеоконтинентов (D_3-C_1). По результатам качественной интерпретации гравитационного и магнитного полей на площади исследований мы моделируем серию надвиговых деформаций, которые искажают структуры Змеиногорско-Быструшинского прогиба. При этом характер складчато-надвиговых деформаций существенно различается на западном, центральном и восточном флангах [30, 31].

Западная часть относительно слабо затронута надвиговыми деформациями, вследствие чего наблюдается высокая мощность вулканогенно-осадочной толщи, включающей древние шельфовые осадки и более молодые девонские вулканические формации [32]. По результатам расчетов методом особых точек оценочная мощность упомянутого слоя составляет 2–3 км.

Центральная часть наиболее интенсивно деформирована надвигами, которые выводят на дневную поверхность раннекаледонские шельфовые осадки. Мощность вулканической толщи здесь минимальна, следовательно, здесь можно ожидать проявления рудных объектов только приконтактового типа.

Восточная часть слабо затронута надвиговыми дислокациями, что позволяет сохранить в исходной форме образования активной континентальной окраины. В вертикальном сечении здесь выделяются вулканогенно-осадочные толщи базальт-дацит-риолитовой формации (D_{1-2} и D_{2-3}).

Вдоль всего профиля картируются ареалы развития гранитоидов (D_3-C_1).

На основе комплексного анализа выполненных построений, с учетом опыта геохимических и минерагенических исследований Рудного Алтая, можно сделать вывод о том, что наибольший интерес при поисках скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения в пределах Змеиногорского рудного района представляет его восточный фланг – Змеиногорско-Быструшинский

прогиб. В данной относительно слабо денудированной зоне предполагается развитие всех трех типов оруденения. Доминирующую роль в их составе играют субвулканические порфировые тела с гнездово-вкрапленным оруденением. Согласно опыту ранее проведенных исследований, рудоформирующие ареалы тяготеют к глубинным разрывным нарушениям [33, 34]. В ходе прогнозных построений в качестве признаков были задействованы параметры гравитационного и магнитного полей, наиболее проявленные на трансформациях горизонтального градиента и локальной составляющей, полученной при разложении полей [35, 36].

Разработанная тектоническая схема и глубинный (тектонический) разрез позволяют выявить ряд геолого-структурных критериев, которые могут использоваться на стадии прогнозноминерагенических построений [37, 38]. К таким критериям относятся:

- развитие трех структурных зон с разным уровнем воздымания и денудации;
- доминирующие разрывные нарушения двух рангов (а – более древние, линейные дислокации (сбросы) относящиеся к рифтогенным событиям; б – более молодые разломы дугообразной морфологии, заложение которых обусловлено влиянием коллизионных процессов, проявившихся в ходе аккреции Сибирского и Казахстанского палеоконтинентов);
- ареалы проявления рудоносных формаций средне-позднедевонского периода и перекрывающих их позднедевонских гранитных комплексов.

Кроме того, следует учитывать проявление более молодых гранитных интрузий (C_1 , T_1) [39], которые могут рассматриваться в качестве одного из факторов, осложняющих поиск скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения [40] в пределах Змеиногорского рудного района, локализованного в зоне рифтогенного Змеиногорско-Быструшинского прогиба.

На основе этих геолого-структурных критериев в дальнейшем планируется выполнение прогнозноминерагенических оценок методом вероятностного распознавания образов с обучением на геологически обоснованных эталонах колчеданно-полиметаллического оруденений.

Заключение

Предложенная технология обработки и интерпретации разнотипной геолого-геофизической информации позволяет выполнить геотектоническое районирование структур, характеризующих геодинамические обстановки, оказавшие особое влияние на закономерности локализации колчеданно-полиметаллического оруденения в пределах Змеи-

ногорского рудного района: тыловодужный рифто-генез позднекаледонской активной континентальной окраины и герцинский коллизионный орогенез, обусловленный коллизионным столкновением Сибирского и Казахстанского палеоконтинентов.

В результате комплексных преобразований нами сделан вывод о необходимости применения

многофакторного анализа для выявления наиболее достоверных геолого-структурных прогнозных критериев локализации скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения с целью последующего решения прогнозных задач вероятностного распознавания образов, связываемых с рассмотренными предпосылками рудоформирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами / В.С. Литвиненко, Е.И. Петров, Д.В. Василевская, А.В. Яковенко, И.А. Наумов, М.А. Ратников // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 95–111.
2. Секерина Д.Д., Дергилева Е.А., Егоров А.С. Закономерности локализации структур каледонского и герцинского орогенеза Рудного Алтая // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 93. – С. 52–62.
3. К проблеме формирования колчеданно-полиметаллических месторождений / Б.А. Дьячков, М.А. Мизерная, А.П. Пяткова, А.Е. Бисатова, А.П. Мирошникова, О.Н. Кузьмина, Н.А. Зимановская, Т.А. Ойцева, З.И. Черненко // Отечественная геология. – 2021. – № 5. – С. 3–16.
4. Moye R.J., Reid J.C., Lee D.F. Volcanogenic polymetallic massive sulfide deposits (VMS) of the Carolina Terrane in central North Carolina: new perspectives and historical reports and data from the files of Phelps Dodge Exploration East (1975–1982) // North Carolina Geological Survey, Special Publication. – 2017. – Vol. 11. – P. 456–467.
5. Peter J.M., Kidder J.A. et al. Stable and radiogenic isotopes in the exploration for volcanogenic massive sulfide deposits // The Canadian Mineralogist. – 2022. – Vol. 60. – P. 433–468.
6. Дистанционные методы исследования в изучении структурно-геологических особенностей строения о. Итуруп (Курильские острова) / И.В. Таловина, Н.С. Крикун, Ю.Ю. Юрченко, А.С. Агеев // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 158–172.
7. Морфометрические параметры сульфидных руд как основа селективной рудоподготовки сырья / А.М. Дурягина, И.В. Таловина, Х. Либервирт, Р.К. Илалова // Записки Горного института. – 2022. – Т. 256. – С. 527–538.
8. Copper and zinc isotope variation of the VMS mineralization in the Kalatag district, eastern Tianshan, NW China / X.-H. Deng, R. Mathur, Y. Li, Q.-G. Mao, Y.-S. Wu, L.-Y. Yang, X. Chen, J. Xu // Journal of Geochemical Exploration. – 2019. – № 196. – P. 8–19.
9. Pilote J.-L., Piercey S.J., Mercier-Langevin P. Evolution of the subseafloor hydrothermal system associated with the Ming VMS deposit, Newfoundland Appalachians, and its controls on base and precious metal distribution // Mineralium Deposita. – 2020. – Vol. 55. – P. 913–936.
10. Серавина Т.В., Кузнецов В.В. Опыт и результаты прогноза и поисков колчеданно-полиметаллических месторождений 2009–2017 гг. // Руды и металлы. – 2018. – № 3. – С. 16–24.
11. Кашин С.В., Молчанов А.В., Шатов В.В. Гидротермально-метасоматические формации регионального распространения и их использование для прогнозирования скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения (на примере Змеиногорского рудного района, Рудный Алтай) // Региональная геология и металлогения. – 2013. – № 56. – С. 65–77.
12. Серавина Т.В., Кузнецова С.В., Филатова Л.К. Особенности вещественного состава вмещающих пород и руд Лазурского рудного поля (Змеиногорский рудный район, Рудноалтайская минерагеническая зона) // Отечественная геология. – 2021. – № 3–4. – С. 36–47.
13. Кузнецова С.В. Некоторые вопросы генезиса и минералогические особенности стратиформных руд колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая, Алтайский край // Руды и металлы. – М.: ЦНИГРИ, 2017. – С. 40–50.
14. Космоструктурная модель Зыряновского рудного района (Рудный Алтай) / Ю.С. Ананьев, А.А. Поцелуев, В.Г. Житков, В.Н. Назаров, А.С. Кузнецов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1: Науки о Земле. – С. 24–31.
15. Age and chemostratigraphy of the Finlayson Lake District, Yukon: implications for Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) / M.J. Manor, S.J. Piercey, D.C. Murphy, C.J. Wall // Mineralization and Tectonics along the Western Laurentian Continental Margin: Lithosphere. – 2022. – Vol. 2022. – P. 1–45.
16. Гаськов И.В. Особенности эндогенной металлогении Горного и Рудного Алтая (Россия) // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 8. – С. 1254–1270.
17. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист М-44 – Рубцовск. Объяснительная записка / Н.И. Гусев, Ю.Е. Вовшин, А.А. Круглова, М.Г. Пушкин и др. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 415 с.
18. Zhiyuan Sun, Xiaohua Deng, Franco Pirajno. Textures, trace element compositions, and sulfur isotopes of pyrite from the Honghai volcanogenic massive sulfide deposit: Implications for ore genesis and mineral exploration // Science China Earth Sciences. – 2023. – Vol. 66. – P. 738–764.
19. Закономерности проявления рудных систем в потенциальных полях / С.Г. Алексеев, А.С. Духанин, Н.П. Сенчина, М.Б. Штокаленко // Материалы 46 сессии Межднар. науч. семинара им. Успенского. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2019. – С. 26–32.
20. Movchan I.B., Yakovleva A.A. Approach to automation of field diagnosis data interpretation for localization of pitting in the pipeline wall // International Journal of Civil Engineering. – 2019. – Vol. 10. – P. 1571–1581.
21. Информационно-статистический прогноз нефтегазоносности в краевой части Корякско-Камчатской складчатой области / Д.Ф. Калинин, А.С. Егоров, Н.В. Большакова, Д.Д. Секерина // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2023. – № 1. Выпуск 57. – С. 63–88.

22. Мовчан И.Б., Шайгаллямова З.И., Яковлева А.А. Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 217–233.
23. Мовчан И.Б., Яковлева А.А. Уточнение оценок сейсмического микрорайонирования с оптимизацией априорных данных // Записки Горного института. – 2019. – Т. 236. – С. 133–141.
24. Духанин А.С., Алексеев С.Г., Сенчина Н.П. Структура струйных ореолов рассеяния глубокозалегающих месторождений Рудного Алтая // Региональная геология и металлогения. – 2019. – № 80. – С. 75–94.
25. Гусев А.И., Гусев Н.И. Геодинамика и металлогения мезозой-кайнозойского этапа Горного Алтая // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 8. – С. 60–65.
26. Denisov N., Piercey S.J. Evolution of the hydrothermal system associated with the ABM replacement-style volcanogenic massive sulfide deposit, Finlayson Lake District, Yukon, Canada // Economic Geology. – 2023. – Vol. 118 (5). – P. 1055–1083.
27. Гусев А.И. Мантийно-коровое взаимодействие в генерации различных типов оруденения: геофизический и петрологический аспекты // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 18–25.
28. Визуализация в потенциальных полях мантийно-коровых структур, контролирующих кимберлитовый и лампроитовый магматизм / С.Г. Алексеев, П.А. Бочков, Н.П. Сенчина и др. // Смирновский сборник. – М.: Макс ПРЕСС, 2018. – С. 292–307.
29. Areas of negative excess density of the Earth's crust as sources of energy for ore formation / M.B. Shtokalenko, S.G. Alekseev, N.P. Senchina, S.Y. Shatkevich. – Kazan: Kazan Federal University, 2019. – Vol. 1. – P. 279–284.
30. Блинов П.А., Садыков М.И. Оценка упруго-прочностных свойств цементно-эпоксидных систем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 97–105.
31. Subseafloor sulphide deposit formed by pumice replacement mineralization / T. Nozaki, T. Nagase, Y. Takaya, T. Yamasaki, T. Otake // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – P. 1–11.
32. Lafrance B., Gibson H.L., Stewart M.S. Internal and external deformation and modification of volcanogenic massive sulfide deposits // Reviews in Economic Geology. – 2020. – Vol. 21. – P. 147–171.
33. Prischepa O.M. et al. Theoretical and methodological approaches to identifying deep accumulations of oil and gas in oil and gas basins of the Russian Federation // Frontiers in Earth Science. – 2023. – Vol. 11. – P. 1–22.
34. Volcanology, geochemistry and geodynamic setting of Neoproterozoic Sunrise volcanogenic massive sulfide deposit, Beaulieu River volcanic belt, Slave craton, Northwest Territories, Canada / Y.M. de Wolfe, B. Knox, S. Lilley, E.J. MacMillan, C.A. Partin // Precambrian Research. – 2022. – Vol. 372. – P. 106608.
35. Ганженко Г.Д., Юдовская М.А., Викентьев И.В. Золото-полиметаллическая минерализация Риддер-Сокольного месторождения на Рудном Алтае (Восточный Казахстан) // Минералогия. – 2018. – № 4 (1). – С. 8–34.
36. Tracing the source of hydrothermal fluid in ophiolite related volcanogenic massive sulfide deposits: a case study from the Italian Northern Apennines / G.B. Kiss, K. Molnár, Z. Benkó, P. Skoda, Z. Kapui, G. Garuti, F. Zaccarini, L. Palscu, G. Czuppon // Minerals. – 2023. – № 13 (8). – P. 2–19.
37. Reconstruction of hydrothermal processes in the Cyprus type Fe-Cu-Zn deposits of the Italian Northern Apennines: results of combined fluid inclusion microthermometry, SEM-CL imaging and trace element analyses by LA-ICP-MS / G.B. Kiss, Z. Bendő, G. Garuti, F. Zaccarini, E. Király, F. Molnár // Minerals. – 2021. – № 11 (2). – P. 1–21.
38. Integration of seismic refraction and fracture-induced electromagnetic radiation methods to assess the stability of the roof in mine-workings / S. Daniliev, N. Danilieva, S. Mulev, V. Frid // Minerals. – 2022. – № 12 (5). – P. 1–11.
39. Коррекция глубинно-скоростных моделей методом гравиметрической разведки для труднодоступных участков шельфовой зоны / Т. Мингалева, Г. Горелик, А. Егоров, В. Гулин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10-1. – С. 77–86.
40. Geochemical evidence for a magmatic contribution to the metal budget of the Windy Craggy Cu-Co(±Zn) volcanogenic massive-sulfide deposit, northwestern British Columbia / M.I. Leybourne, J.M. Peter, M.A. Schmidt, D. Layton-Matthews, A. Voinot, L. Mathieu // Geological Survey of Canada. – 2022. – № 617. – P. 287–312.

Информация об авторах

Алексей Сергеевич Егоров, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геофизики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. egorov_as@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3501-9145>

Дмитрий Федорович Калинин, доктор технических наук, профессор кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. kalinin_df@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0597-263X>

Дарья Денисовна Секерина, аспирант кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. sekerinadar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3892-7947>

Поступила в редакцию: 17.10.2023

Поступила после рецензирования: 31.10.2023

Принята к публикации: 19.06.2024

REFERENCES

1. Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Notes of the Mining Institute*, 2023, no. 259, pp. 95–111. (In Russ.)
2. Sekerina D.D., Dergileva E.A., Egorov A.S. Regularities of localization of structures of the Caledonian and Hercynian orogeny of the Ore Altai. *Regional geology and metallogeny*, 2023, no. 93, pp. 52–62. (In Russ.)
3. Dyachkov B.A., Misernaya M.A., Pyatkova A.P., Bisatova A.E., Miroshnikova A.P., Kuzmina O.N., Zimanovskaya N.A., Oitseva T.A., Chernenko Z.I. On the problem of formation of pyrite-polymetallic deposits. *Russian Geology*, 2021, no. 5, pp. 3–16. (In Russ.)
4. Moye R.J., Reid J.C., Lee D.F. Volcanogenic polymetallic massive sulfide deposits (VMS) of the Carolina Terrane in central North Carolina: new perspectives and historical reports and data from the files of Phelps Dodge Exploration East (1975–1982). *North Carolina Geological Survey, Special Publication*, 2017, no. 11, pp. 456–467.
5. Peter J.M., Kidder J.A. Stable and radiogenic isotopes in the exploration for volcanogenic massive sulfide deposits. *The Canadian Mineralogist*, 2022, vol. 60, pp. 433–468.
6. Talovina I.V., Krikun N.S., Yurchenko Yu.Yu., Ageev A.S. Remote research methods in the study of structural and geological features of the structure of O. Iturup (Kuril Islands). *Notes of the Mining Institute*, 2022, no. 254, pp. 158–172. (In Russ.)
7. Duryagina A.M., Talovina I.V., Liebertvirt H., Ilalova R.K. Morphometric parameters of sulfide ores as a basis for selective ore preparation of raw materials. *Notes of the Mining Institute*, 2022, no. 256, pp. 527–538. (In Russ.)
8. Deng X.-H., Mathur R., Li Y., Mao Q.-G., Wu Y.-S., Yang L.-Y., Chen X., Xu J. Copper and zinc isotope variation of the VMS mineralization in the Kalatag district, eastern Tianshan, NW China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, no. 196, pp. 8–19.
9. Pilote J.-L., Piercey S.J., Mercier-Langevin P. Evolution of the subseafloor hydrothermal system associated with the Ming VMS deposit, Newfoundland Appalachians, and its controls on base and precious metal distribution. *Mineralium Deposita*, 2020, no. 55, pp. 913–936.
10. Seravina T.V., Kuznetsov V.V. Experience and results of forecasting and prospecting of pyrite-polymetallic deposits 2009–2017. *Ores and metals*, 2018, no. 3, pp. 16–24. (In Russ.)
11. Kashin S.V., Molchanov A.V., Shatov V.V. Hydrothermal-metasomatic formations of regional distribution and their use for forecasting hidden pyrite-Polymetallic mineralization (on the example of the Zmeinogorsky ore district, Rudny Altai). *Regional geology and metallogeny*, 2013, no. 56, pp. 65–77. (In Russ.)
12. Seravina T.V., Kuznetsova S.V., Filatova L.K. Features of the material composition of the host rocks and ores of the Lazursky ore field (Zmeinogorsky ore district, Rudnoaltay minerogenic zone). *Russian Geology*, 2021, no. 3–4, pp. 36–47. (In Russ.)
13. Kuznetsova S.V. Some questions of genesis and mineralogical features of stratiform ores of pyrite-polymetallic deposits of the Ore Altai, Altai Krai. *Ores and Metals*. Moscow, TsNIGRI, 2017. pp. 40–50. (In Russ.)
14. Ananyev Yu.S., Potseluyev A.A., Zhitkov V.G., Nazarov V.N., Kuznetsov A.S. Cosmostructural model of the Zyryanovsky ore district (Rudny Altai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 24–31. (In Russ.)
15. Manor M.J., Piercey S.J., Murphy D.C., Wall C.J. Age and chemostratigraphy of the Finlayson Lake District, Yukon: implications for Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) Mineralization and Tectonics along the Western Laurentian Continental Margin: *Lithosphere*, 2022, vol. 2022, pp. 1–45.
16. Gaskov I.V. Features of endogenous metallogeny of the Mining and Ore Altai (Russia). *Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 8, pp. 1254–1270.
17. Gusev N.I., Vovshin Yu.E., Kruglova A.A., Pushkin M.G. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Altai-Sayan series. Sheet M-44 – Rubtsovsk. Explanatory note*. St. Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2015. 415 p. (In Russ.)
18. Zhiyuan Sun, Xiaohua Deng, Franco Pirajno. Textures, trace element compositions, and sulfur isotopes of pyrite from the Honghai volcanogenic massive sulfide deposit: Implications for ore genesis and mineral exploration. *Science China Earth Sciences*, 2023, vol. 66, pp. 738–764.
19. Alekseev S.G., Dukhanin A.S., Senchina N.P., Shtokalenko M.B. Patterns of manifestation ore systems in potential fields. *Proceedings of the 46th session of the International Scientific seminar named after Uspensky*. Perm, GI UrO RAS Publ., 2019. pp. 26–32. (In Russ.)
20. Movchan I.B., Yakovleva A.A. Approach to automation of field diagnosis data interpretation for localization of pitting in the pipeline wall. *International Journal of Civil Engineering*, 2019, vol. 10, pp. 1571–1581.
21. Kalinin D.F., Egorov A.S., Bolshakova N.V., Sekerina D.D. Information and statistical forecast of oil and gas potential in the marginal part of the Koryak-Kamchatka folded region. *Herald of KRAUNTS. Earth sciences*, 2023, no. 1, Iss. 57, pp. 63–88. (In Russ.)
22. Movchan I.B., Shaigallyamova Z.I., Yakovleva A.A. Identification of factors of structural control of indigenous gold ore manifestations by the method of unmanned aerial magnetic exploration on the example of the Neryungrinsky district of Yakutia. *Notes of the Mining Institute*, 2022, vol. 254, pp. 217–233.
23. Movchan I.B., Yakovleva A.A. Refinement of estimates of seismic microdistricting with optimization of a priori data. *Notes of the Mining Institute*, 2019, vol. 236, pp. 133–141.
24. Dukhanin A.S., Alekseev S.G., Senchina N.P. Structure of jet scattering halos of deep-lying deposits of the Ore Altai. *Regional geology and metallogeny*, 2019, no. 80, pp. 75–94. (In Russ.)
25. Gusev A.I., Gusev N.I. Geodynamics and metallogeny of the Mesozoic-Cenozoic stage of the Altai Mountains. *Modern High-tech Technologies*, 2014, no. 8, pp. 60–65. (In Russ.)
26. Denisová N., Piercey S.J. Evolution of the hydrothermal system associated with the ABM replacement-style volcanogenic massive sulfide deposit, Finlayson Lake District, Yukon, Canada. *Economic Geology*, 2023, vol. 118 (5), pp. 1055–1083.
27. Gusev A.I. Mantle-crustal interaction in the generation of various types of mineralization: geophysical and petrological aspects. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 18–25. (In Russ.)

28. Alekseev S.G., Bochkov P.A., Senchina N.P. Visualization in potential fields of mantle-crustal structures controlling kimberlite and lamproite magmatism. *Smirnov Collection*. Moscow, Max PRESS, 2018. pp. 292–307. (In Russ.)
29. Shtokalenko M.B., Alekseev S.G., Senchina N.P., Shatkevich S.Y. Areas of negative excess density of the Earth's crust as sources of energy for ore formation. Ed. By D.K. Nurgaliev. Kazan, Kazan Federal University Publ., 2019. Vol. 1, pp. 279–284. (In Russ.)
30. Blinov P.A., Sadykov M.I. Assessment of elastic-strength properties of cement-epoxy systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 97–105. (In Russ.)
31. Nozaki T., Nagase T., Takaya Y., Yamasaki T., Otake T. Subseafloor sulphide deposit formed by pumice replacement mineralization. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, pp. 1–11.
32. Lafrance B., Gibson H.L., Stewart M.S. Internal and external deformation and modification of volcanogenic massive sulfide deposits. *Reviews in Economic Geology*, 2020, vol. 21, pp. 147–171.
33. Prischepa O.M. Theoretical and methodological approaches to identifying deep accumulations of oil and gas in oil and gas basins of the Russian Federation. *Frontiers in Earth Science*, 2023, vol. 11, pp. 1–22.
34. De Wolfe Y.M., Knox B., Lilley S., MacMillan E.J., Partin C.A. Volcanology, geochemistry and geodynamic setting of Neoproterozoic Sunrise volcanogenic massive sulfide deposit, Beaulieu River volcanic belt, Slave craton, Northwest Territories, Canada. *Precambrian Research*, 2022, vol. 372, pp. 106608.
35. Ganzhenko G.D., Yudovskaya M.A., Vikentiev I.V. Gold-polymetallic mineralization of the Ridder-Sokolny deposit in the Ore Altai (East Kazakhstan). *Mineralogy*, 2018, no. 4 (1), pp. 8–34. (In Russ.)
36. Kiss G.B., Molnár K., Benkő Z., Skoda P., Kapui Z., Garuti G., Zaccarini F., Palcsu L., Czuppon G. Tracing the source of hydrothermal fluid in ophiolite related volcanogenic massive sulfide deposits: a case study from the Italian Northern Apennines. *Minerals*, 2023, no. 13 (8), pp. 2–19.
37. Kiss G.B., Bendő Z., Garuti G., Zaccarini F., Király E., Molnár F. Reconstruction of hydrothermal processes in the Cyprus type Fe-Cu-Zn deposits of the Italian Northern Apennines: results of combined fluid inclusion microthermometry, SEM-CL imaging and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Minerals*, 2021, no. 11 (2), pp. 1–21.
38. Daniliev S., Danilieva N., Mulev S., Frid V. Integration of seismic refraction and fracture-induced electromagnetic radiation methods to assess the stability of the roof in mine-workings. *Minerals*, 2022, no. 12 (5), pp. 1–11.
39. Mingaleva T., Gorelik G., Egorov A., Gulin V. Correction of depth-velocity models by the method of gravimetric exploration for hard-to-reach areas of the shelf zone. *Mining information and analytical bulletin*, 2022, no. 10 (1), pp. 77–86. (In Russ.)
40. Leybourne M.I., Peter J.M., Schmidt M.A., Layton-Matthews D., Voinot A., Mathieu L. Geochemical evidence for a magmatic contribution to the metal budget of the Windy Craggy Cu-Co(±Zn) volcanogenic massive-sulfide deposit, northwestern British Columbia. *Geological Survey of Canada, Bulletin*, 2022, no. 617, pp. 287–312.

Information about the authors

Alexey S. Egorov, Dr. Sc., Head of the Geophysics Department, Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 191106, Russian Federation. egorov_as@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3501-9145>

Dmitry F. Kalinin, Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 191106, Russian Federation. kalinin_df@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0597-263X>

Darya D. Sekerina, Postgraduate Student, Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 191106, Russian Federation. sekerinadar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3892-7947>

Received: 17.10.2023

Revised: 31.10.2023

Accepted: 19.06.2024