

Новые подходы к прогнозированию крупных и суперкрупных месторождений стратегических металлов

Волков А.В. , Галямов А.Л. 

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, tma2105@mail.ru

Аннотация. В результате исследований выделены главные рудообразующие системы – источники стратегических металлов; создана база данных месторождений и перспективных рудопоявлений стратегических и высокотехнологичных металлов России; подготовлены геолого-генетические модели, а на их основе прогнозно-поисковые модели крупных месторождений стратегических металлов; разработаны новые подходы к прогнозированию крупных месторождений стратегических металлов, в том числе на основе данных космического аппарата GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer), позволяющих использовать элементы глубинного строения земной коры в прогнозно-поисковых моделях; составлена серия прогнозно-металлогенических карт территории различных регионов России.

Ключевые слова: Россия, рудообразующая система, высокотехнологичные металлы, месторождения, база данных, металлогения, GOCE, прогнозирование, потенциал.

New approaches to forecasting large and super-large deposits of strategic metals

Volkov A.V. , Galyamov A.L. 

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, tma2105@mail.ru

Abstract. As a result of research the main ore-forming systems – sources of strategic metals are identified; a database of deposits and promising ore occurrences of strategic and high-tech metals of Russia has been created; geological and genetic models have been prepared, and on their basis predictive prospecting models of large deposits of strategic metals; new approaches to forecasting large deposits of strategic metals have been developed, including on the basis of data from the GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) spacecraft, which allow using elements of the deep structure of the Earth's crust in predictive prospecting models; a series of predictive metallogenic maps of the territory of various regions of Russia has been compiled.

Keywords: Russia, ore-forming system, high-tech metals, deposits, database, metallogeny, GOCE, forecasting, potential.

Введение

Россия располагает минерально-сырьевым комплексом (МСК) мирового класса, представляющим собой фундамент экономики страны, а также является одним из ведущих экспортёров минерального сырья и его первичной продукции. Развитие экономики, национальная безопасность, и уровень жизни населения Российской Федерации в значительной степени зависят от мощной горнодобывающей промышленности и надёжной минерально-сырьевой базы (МСБ). Однако, проблема обеспеченности высокотехнологичной промышленности России минеральным сырьём с каждым годом становится все более острой в связи с неуклонным сокращением богатых и относительно доступных в техническом и экономическом отношении месторождений и неустойчивостью его импорта из стран-производителей вследствие политической нестабильности в мире.

В статье обсуждаются результаты металлогенических исследований последних лет. В ходе исследований создана база данных месторождений и перспективных рудопоявлений стратегических и высокотехнологичных металлов России; выделены главные рудообразующие системы – источники высокотехнологичных критических металлов; выполнены металлогенические исследования на основе пространственно-статистического ГИС-анализа; составлены варианты прогнозно-металлогенических карт размещения рудообразующих систем стратегических и высокотехнологич-

ных металлов, разработаны новые подходы к прогнозированию крупных месторождений стратегических металлов.

Концепция рудообразующей (минеральной) системы

Под рудообразующей системой мы, вслед за Д.В. Рундквистом (1968), понимаем комплекс взаимосвязанных процессов генерации рудоносных флюидов, их миграции к поверхности и разгрузки на геохимических барьерах, определяющих формирование аномальных скоплений полезных ископаемых. Определение рудообразующей (минеральной) системы по мировым источникам (Рундквист, 1968; Pirajno, 2009; Joly et al., 2015; Hagemann et al., 2016; 2000), аналогична концепции нефтяной системы, но из-за особенностей природы рудных месторождений и вмещающих пород минеральная система гораздо более разнообразна и сложна (рис. 1).

В таких системах принято выделять корневую зону (область магмо- и флюидозарождения), зону транспорта (тепломассопереноса) и зону концентрированного рудоотложения. Для изучения, как правило, доступна лишь зона рудоотложения, которая реализуется в виде ареала развития оруденения, гидротермально измененных пород и ореолов рассеяния рудного вещества, выделяемых в качестве рудных узлов.

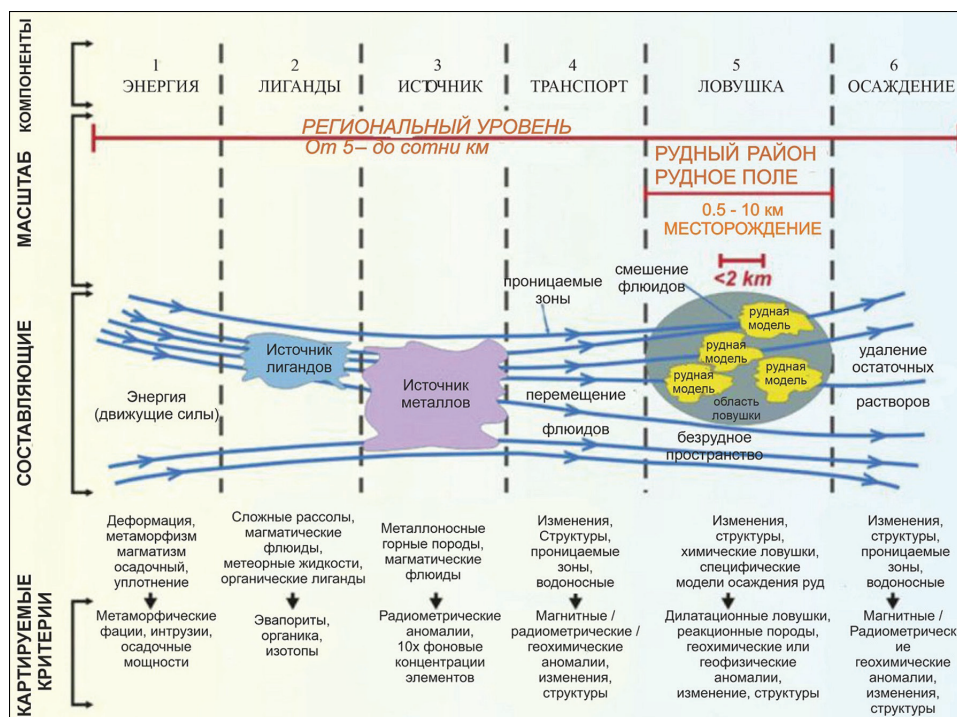


Рис. 1. Концепция рудообразующей (минеральной) системы, модифицировано из (Hagemann et al., 2000, 2016).

Fig. 1. The concept of an ore-forming (mineral) system, modified from (Hagemann et al., 2000, 2016).

Для формирования рудного месторождения требуется источник металлов, агенты транспортировки (флюиды или магмы) и область осаждения или накопления руд. Объединяющая все эти процессы рудообразующая система включает все геологические и геодинамические факторы на всех масштабных уровнях, которые контролируют возникновение, развитие и сохранение рудных месторождений.

Выделению рудообразующих систем должны сопутствовать: (1) локальные исследования на известных месторождениях, включая изучение их геологического строения, типов горных пород, расположение потенциальных рудовмещающих структур, физико-химические процессы рудообразования; (2) исследования регионального масштаба, включающие изучение геодинамического контроля размещения рудных месторождений, физико-химических процессов в масштабе крупного

геологического блока, определяющих формирование рудных месторождений; эволюции магм и других источников энергии и флюидов в масштабе рудообразующей системы.

Таблица. Краткая характеристика главных рудообразующих систем стратегических металлов России.

Table. Brief description of the main ore-forming systems of strategic metals of Russia.

Рудообразующая система (тип месторождения)	Геологическая обстановка	Главные металлы	Попутные критические металлы	Примеры месторождений
Магматическая базитовая и ультрабазитовая (Ni–Cu коматиитовый, Ni–Cu, PGE и Fe–V–Ti в расслоенных базитовых и ультрабазитовых интрузиях)	Зеленокаменные докембрийские пояса, островодужные офиолиты, орогенные пояса	Ni, Cu, Co, PGE, Fe, V, Ti,	Au, Ag, Te, Se	Норильская и Печенгская группы, Кингаш, Чинейское, Медведковское
Скарново-порфировая и порфирово-эпitherмальная (Cu–Mo–Au- и Cu–Mo-порфировый, Au–Ag и Pb–Ag эпitherмальный, Cu–Au и Pb–Zn скарновый)	Островодужные, окраинно- и внутриконтинентальные вулканоплутонические пояса	Cu, Mo, Au, Ag	Re, Sb, Pt, Pd, Pb, Zn, Te, In, Se, Bi, Cd, W, REE	Песчанка, Малмыж, Быстринское, Михеевское, Синюхинское, Сорское, Бугдаинское, Дукаг, Гольцовое,
Орогенная, связанная с интрузивами гранитоидов (Au–Bi, Sn–W, Mo–W- и Mo- жильно-штокерковый, Mo–W скарновый), Ta–Li–Sn–Be пегматитовый	Магматические пояса, области и зоны тектономагматической активизации пассивных континентальных окраин	Au, Sn, W, U, Mo, B, Sb, Li, Ta, Be	Re, Bi, In, Cd, Ge, REE, Ag, Pb, Zn, Te, Co, U	Правоурмийское, Депутатское, Инкурское, Холтосонское, Вишняковское, Тигриное, Забытое, м-я Колымского пояса
Колчеданные вулканогенные и осадочно-вулканогенные (Cu–Zn и Cu–Zn–Pb)	Островодужные вулканические пояса, зоны рифтогенеза	Cu, Zn, Pb, Ag, Au	Bi, Cd, Te, In, Se	Уральская и Алтае-Саянская группы
Осадочных бассейнов (Миссисипи тип Zn–Pb–Ag, медистые песчаники (Cu–Co–Ag), несогласий (U), долинный (U) и др.)	Платформы, энсалические бассейны, рифтогенные зоны, пассивные континентальные окраины	Cu, Co, Mn, Zn, Pb, U, Ag	Re, Bi, In, Cd, Ge, REE, Ag, Pb, Zn, Te, Sc, Sr, Ga, Ga	Сардана, Павловское, Удокан, Хиагдинская группа, Дулурское
Связанная с щелочными гранитами (Nb, Ta, Zr, Be, REE-месторождения)	Внутриплитная, все типы бассейнов и фундамента	Nb, Ta, Be, Zr, REE, криолит	U, Th, Au, Ag, Te, Co, Sr, Rb, Pb, Zn, Sn	Катугинское, Зашихинское, Улуг-Танзек
Связанная с массивами ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов (Nb, Ta, апатитовые, железорудные, REE- и U–Th месторождения)	Внутриплитная, все типы бассейнов и фундамента	U, Th, Nb, REE, Ta, апатит, магнетит	Au, Ag, Te, Co, Sr,	Хибинская группа, Томтор, Белозиминское, Чукотконское и др.
Россыпей и кор выветривания (Au, Sn, W, PGE, Ti–Zr, палеороссыпи Au–U), вторичного обогащения (Cu, Zn и Pb безсульфидный, бокситы, Ni–Co–Cr латеритовый), соленых озер (Li–K–B)	Все	Au, Sn, Ti, W, Zr, Ni, Fe, Li, B, алмазы, PGE, K, бокситы	REE, Co, Cr, Ga, Sc, Mn, Re	Ичувеевская, Рывеевская, Берелехская, Чайжоринская, Тирехтах, Одинокое, Млелювеев, Серовское, Красная шапочка, Баскунчак

Примечание: таблица составлена на основе (Бортников и др., 2016).

Главные рудообразующие системы – источники стратегических металлов на территории России

К стратегическим видам в мире в основном относят минеральное сырье, которое лежит в основе высоких технологий и имеет важнейшее значение для поступательного развития многих отраслей промышленности (Бортников и др., 2016).



Рис. 2. Основные месторождения стратегических металлов РФ. Крупными значками показаны крупные месторождения, мелкими – мелкие и средние. Крупные месторождения стратегических высокотехнологических металлов РФ. Крупными значками показаны крупные месторождения, мелкими – мелкие и средние.

Fig. 2. The main deposits of strategic metals of the Russian Federation. Large icons show large deposits, small – small and medium. Large deposits of strategic high-tech metals of the Russian Federation. Large icons show large deposits, small – small and medium.

В таблице приведена краткая характеристика 8 главных рудообразующих систем высокотехнологических критических металлов России: расслоенных интрузивов основных пород (магматическая базитовая и ультрабазитовая); скарново-порфировая и порфирово-эпитермальная; орогенная (в том числе связанная с интрузивами гранитоидов); связанная с щелочными гранитами; ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов; колчеданно-вулканогенная и осадочно-вулканогенная; осадочных бассейнов; россыпей и кор выветривания. Расположение основных месторождений высокотехнологических критических металлов на территории России показано на обзорной карте (рис. 2).

Для каждой рудообразующей системы характерны свои промышленные и минеральные типы месторождений, отличающиеся набором основных и важнейших попутных компонентов (в том числе и критических) и по технологическим свойствам руд.

База данных месторождений и перспективных рудопроявлений стратегических металлов на территории России

В ходе исследований подготовлена база данных месторождений и перспективных рудопроявлений стратегических металлов, состоящая из связанных между собой информационных блоков, характеризующих примеры минеральных месторождений, геологическую среду их размещения, интегральные модели, отражающие условия рудообразования и геодинамические обстановки развития рудообразующих систем.

На территории Российской Федерации выявлены более 18 000 рудных объектов разного ранга, от рудопроявления до крупных месторождений, среди которых насчитывается около 8 тыс. золоторудных объектов, медных – более тысячи, свинцово-цинковых – около 2 тысяч и редкометалльных – более тысячи. Кроме того, известны Pb-Zn месторождения и рудопроявления скарнового, связанного с карбонатитами и эпитермального в терригенных толщах типов – менее значимые для промышленности. При этом среди свинцово-цинковых месторождений миссиссиппский тип (MVT) на-

считывает более 80, тип SEDEX – более ста, а колчеданный тип (VMS) – около двухсот объектов. На основе этой базы данных были составлены обзорные карты (рис. 2).

Месторождений, в рудах которых стратегические высокотехнологичные металлы являются основными и попутными компонентами, насчитывают менее тысячи двухсот, из них около двухсот – крупные (рис. 2). В этой выборке выделяется до 200 мелких и средних месторождений, руды которых отличаются повышенной комплексностью: в них в виде основных и попутных насчитывается более пяти компонентов, входящих в группу стратегических высокотехнологичных металлов.

Анализ базы данных показал, что наиболее комплексные руды характерны для следующих минеральных типов: редкоземельно-редкометалльный апогранитовый, щелочных метасоматитов, апатит-редкоземельно-редкометалльный, редкометалльный пегматитовый, касситерит-вольфрамитовый грейзеновый, медно-колчеданный в вулканогенно-осадочных, медно-цинково-колчеданный, колчеданно-полиметаллический в терригенных и вулканогенных породах и базитовый титаномagnetит-ильменит-ванадиевый. В химический состав руд месторождений, перечисленных минеральных типов входят Ag, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cs, Cu, Ga, Ge, Hf, Hg, In, La, Li, Nb, Rb, REE, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zr.

Металлогенические исследования на основе пространственно-статистического ГИС анализа

Общая методология ГИС-анализа заключается в изучении пространственно-временной роли различной геодинамической природы блоков земной коры в локализации и времени образования металлоносных геологических формаций и связанных с ними месторождений полезных ископаемых. Для проведения ГИС-анализа применялись методические приемы, заложенные в аналитический аппарат ARCMAP, MAPINFO и других картографических математико-аналитических систем. Наиболее эффективными показали себя устоявшиеся методы выявления и оценки пространственных связей (растровой алгебры, нечеткой логики, вероятностного анализа и др.). Этапы прогнозирования и оценки крупных месторождений и перспективных рудопроявлений стратегических металлов показаны на рисунке 3.

Металлогенические исследования показали, что прогнозирование стратегических месторождений определяет комплекс признаков, включающий: (1) оценку потенциальной перспективности рудовмещающих геологических формаций на основе геодинамических обстановок их формирования, в том числе; (2) исследование глубинных структурных преобразований земной коры, определяющих региональные критерии выявления новых крупных месторождений стратегических металлов, в т. ч. и не выходящих на поверхность.



Рис. 3. Этапы прогнозирования и оценки крупных месторождений и перспективных рудопроявлений стратегических металлов.

Fig. 3. Stages of forecasting and evaluation of large deposits and promising ore occurrences of strategic metals.

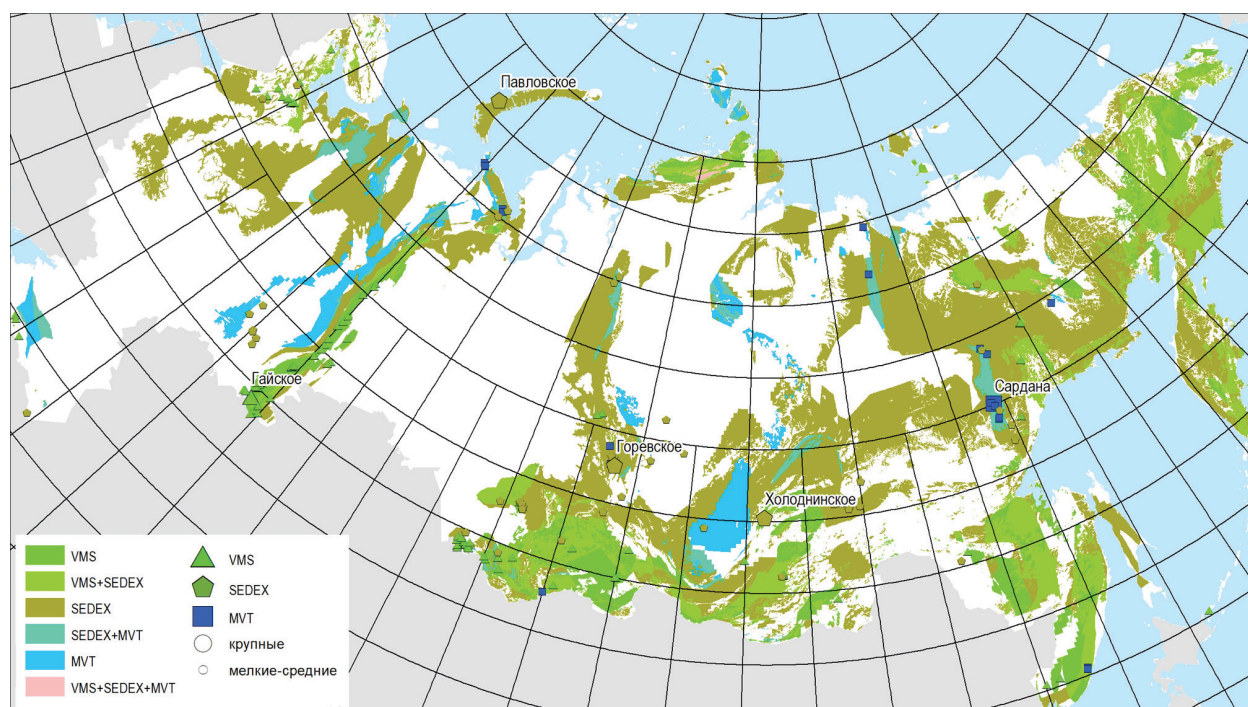


Рис. 4. Сводные признаки на выявление новых Pb-Zn-месторождений MVT, SEDEX и VMS.

Fig. 4. Summary signs for the identification of new Pb-Zn deposits MVT, SEDEX and VMS.

Кроме того, необходимо учитывать, что для выявления закономерностей пространственных связей требуется использовать данные не только для изучаемой площади, но и для ее обрамления. Поэтому, пространственно-статистический анализ осуществлялся с охватом значительно большего пространства, а также все северное полушарие Земли.

В связи с этим, пространственно-статистический ГИС-анализ включал:

- 1) анализ закономерностей размещения месторождений стратегических металлов в различных геологических формациях;
- 2) анализ возраста рудовмещающих формаций и геодинамических обстановок их образования;
- 3) выявление пространственно-временных связей рудных месторождений с различными свойствами земной коры: строением, вариации мощности, неоднородности границ между слоями коры, коры и верхней мантии и др.;
- 4) выделение потенциально перспективных геодинамических обстановок формирования руд и вмещающих толщ;
- 5) анализ позиции месторождений в различной по глубинному строению земной коре с выделением ее дислоцированных областей, потенциально перспективных на выявление новых рудных месторождений.

На территории РФ выделены три базовые геодинамические обстановки размещения стратегических месторождений высокотехнологичных металлов: выступы древнего основания, пассивная континентальная окраина и островодужные комплексы активной окраины. Дальнейшее развитие представлений о региональных рудообразующих системах, предполагает выделение типовых областей – источников стратегических металлов, типовых геодинамических блоков земной коры, про- ницаемых для флюидов и магм.

Общая пространственная статистика показывает, что в пределах локальных зон утолщения коры размещается более 65 % всех мировых месторождений и проявлений благородных, цветных, редких, черных и благородных металлов. В геофизической глобальной модели земной коры наиболее резкие локальные утолщения и утонения ее глубинных слоев проявлены в виде обособленных зон аномальной изменчивости (градиента) мощности средней и нижней коры (рис. 4).

Положение этих зон, в целом, соответствует коллизионным областям (Тетис, Урал, Байкало-Патом, Алданский щит, Таймыр, Приморье). По соотношению градиентных зон в размещении Pb-Zn-месторождений отмечается их отчетливая приуроченность к эпизонам над блоками наиболее изменчивой по мощности нижней корой (рис. 4). Причем, колчеданное оруденение тяготеет при этом к областям с утоненной верхней корой. Таким образом, из пространственных соотношений размещения свинцово-цинковых месторождений и различия структуры вмещающих блоков коры вытекают основные глобальные закономерности размещения Pb-Zn месторождений.

Первое – это приуроченность MVT- и SEDEX-месторождений к флангам крупных осадочных бассейнов, сложенных платформенными и субплатформенными комплексами с устойчивыми признаками нефтегазоносности. Такие территории отмечаются на Северо-Востоке России, где, в частности, на флангах Виллюйской нефтегазоносной провинции размещаются недоизученное месторождение Менгенилер на севере и объекты Сарданского узла на юге.

Второе – высокая изменчивость мощности нижней коры, вследствие интенсивного развития разрывных нарушений и диапиризма. При этом, месторождения MVT-типа, часто совместно с объектами SEDEX-типа, тяготеют к верхней и осадочной коре, а руды VMS-типа, часто вместе с эксгальационными рудами (SEDEX) – над наиболее изменчивыми по мощности участками нижней и средней коры. Расположение этих потенциально перспективных областей показано на рисунке 4. Учитывая непрямой характер признака, следует рассматривать его лишь как косвенный инструмент для совместного использования с прямыми признаками (коренные проявления руд и геохимические аномалии).

Для ГИС-анализа пространственных соотношений геологической структуры и геодинамических обстановок формирования месторождений стратегических металлов России использованы результаты современных исследований литосферы на основе гравитационных данных, полученных космическим аппаратом GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer): глобальные карты глубины поверхности Мохо, мощности и строения осадочного чехла, модель CRUST1.0 (Волков и др., 2020). Модель CRUST1.0, унаследована из модели CRUST2.0 (Artemieva et al., 2012), мощности и строения осадочного чехла (Laske et al., 2013) – содержит данные о глубине Мохо, плотности трехслойного осадочного чехла, а также верхнего, среднего и нижнего слоев консолидированной коры. В данной публикации результаты ГИС-анализа на основе этой модели продемонстрированы на примере Pb-Zn-месторождений MVT, SEDEX и VMS типов (рис. 4).

Следующий этап в развитии представлений о перспективности и распространении региональных рудообразующих систем, состоит и выделении типовых областей, являющихся источниками стратегических металлов, типовых геодинамических блоков земной коры, являвшихся проницаемыми каналами для продвижения флюидов и магм. Комплексное изучение месторождений позволит решить проблему сырьевых источников большинства стратегических металлов.

Заключение

Прогнозные карты, созданные на основе развития концепции рудообразующих систем, пространственно-статистического ГИС-анализа, и создания глубинных геолого-геофизической модели земной коры – основной результат разработки новых подходов к прогнозированию металлогенических исследований последних лет – полезный инструмент для определения районов с высоким потенциалом размещения определенных рудообразующих систем, используют все знания и данные, доступные на территории проекта. Эти карты могут использоваться геологоразведочными и горнодобывающими компаниями, занимающимися поисками и оценкой месторождений стратегических и высокотехнологических металлов, для выбора районов для выявления новых проектов или уточнения их поисковых площадей, а также ранжировать поисково-оценочные цели и выделить области с потенциалом для различных типов минерализации. Кроме того, они могут использоваться правительственными структурами для предоставления предконкурсных материалов для производственных геологоразведочных компаний, а также для принятия внутренних решений по недропользованию.

Различные цели будут влиять на детализацию и масштаб проводимых работ, а также на решение данных, необходимых для выполнения задачи. Однако в каждом из этих сценариев крайне важно убедиться, что результаты – статистически достоверные, геологически-значимые и практически полезные. Если конечный пользователь – геологоразведочная компания, то карты, которые сокращают область поиска до небольшой цели, могут считаться приоритетными. Напротив, если результаты используются для определения перспективных областей, для поисков новых месторождений и для целей планирования недропользования, то на картах выделяются большие площади.

Выполненные исследования показывают, что помимо выделения перспективных на открытие новых месторождений площадей в пределах существующих рудных районов, дополнительные рудные районы без известной экономической минерализации также могут быть выделены как перспективные. Эти районы предоставляют новые возможности для получения новых данных с более высоким разрешением для дальнейшего анализа с целью направления геологоразведочных работ регионального масштаба. Разработка более удобных для отображения на прогнозно-металлогенических картах репрезентативных исходных данных должно стать основным организующим принципом будущих металлогенических исследований.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 13.1902.21.0018, соглашение 075-15-2020-802).

Литература

1. Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Аристов В.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 68. № 2. С. 97–119.
2. Волков А.В., Галямов А.Л., Савчук Ю.С. Применение моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии, созданных на основе гравитационных данных спутника ГОСЕ, в металлогеническом анализе // Исследование Земли из космоса. 2020. № 4. С. 41–50.
3. Рундквист Д.В. Пульсационная гипотеза С.С. Смирнова в свете новых данных о процессах рудообразования // Проблемы региональной металлогении и эндогенного рудообразования. Л.: ВСЕГЕИ, 1968. С. 46–66.
4. Artemieva I.M., Meissner R. Crustal thickness controlled by plate tectonics: a review of crust–mantle interaction processes illustrated by European examples. *Tectonophysics*. 2012. V. 519. P. 3–34.
5. Hagemann S.G., Cassidy K.F. Archean orogenic lode gold deposits // *Rev Econ Geol*. 2000. V.13. P. 9–68.
6. Hagemann S.G., Lisitsin V., Huston D.L. Mineral system analysis: Quo Vadis // *Ore Geology Reviews*. 2016. V. 76. P. 504–522.
7. Joly A., Porwal A., McCuaig T.C., Chudasama B., Dentith M.C., Aitken A.R.A. Mineral systems approach applied to GIS-based 2D-prospectivity modeling of geological regions: Insights from Western Australia // *Ore Geology Reviews*. 2015. V. 71. P. 673–702.
8. Laske G., Masters G., Ma Z., Pasyanos M.E. Update on CRUST1.0 - A 1-degree global model of Earth's crust. // *Geophys. Res. Abstr.* 2013. V. 15. EGU2013-2658.
9. Pirajno F. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer, 2009. 1250 p.