

УДК 553.493.5 / DOI 10.31343/1029–7812–17–1–22–28

А. В. Волков

Институт геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии
Российской Академии наук

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ КРУПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРАТЕГИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ

Синтез полученных материалов по источникам металлов, агентам их транспортировки и областям осаждения или накопления руд дает возможность районирования наиболее перспективных территорий на выявление новых крупных месторождений стратегических металлов. В результате исследований выделены главные рудообразующие системы – источники стратегических металлов; создана база данных месторождений и перспективных рудопроявлений стратегических и высокотехнологических 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, высокотехнологические металлы, месторождения, база данных, металлогения, GOCE, прогнозирование, потенциал.

Synthesis of the obtained materials by sources of metals, agents of their transportation and areas of deposition or accumulation of ores makes it possible to zone the most promising territories to identify new large deposits of strategic metals. 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.

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 сырьем 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.

Статья написана на основе доклада, сделанного на первых чтениях серии «Легенды геологии», посвященных академику РАН Д.В. Рундквисту, – выдающемуся российскому геологу. В статье обсуждаются результаты металлогенических исследований последних лет, начатых еще при жизни Д.В. Рундквиста и во многом стимулированные его научным наследием. В ходе исследований создана база данных месторождений и перспективных рудопроявлений стратегических и высокотехнологических металлов России; выделены главные рудообразующие системы – источники высокотехнологических критических металлов; выполнены металлогенические исследования на основе пространственно–статистического ГИС–анализа; составлены варианты прогнозно–металлогенических карт размещения рудообразующих систем стратегических и высокотехнологических 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; Nagemann et al., 2000, 2016) аналогична концепции нефтяной системы, но из-за особенностей природы рудных месторождений и вмещающих пород минеральная система гораздо более разнообразна и сложна (рис. 1, стр. 28).

Таблица. Краткая характеристика главных рудообразующих систем стратегических металлов России (по: Бортников и др., 2016, с изменениями и дополнениями)

Рудообразующая система (тип месторождения)	Геологическая обстановка	Главные металлы	Попутные критические металлы	Примеры месторождений
Магматическая базитовая и ультрабазитовая (Ni–Cu коматитовый, 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-эпитермальная (Cu–Mo–Au- и Cu–Mo–порфировый, Au–Ag и Pb–Ag эпитермальный, 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, Дукат, Гольцовое, Мутновское, Дальнегорская группа
Орогенная, связанная с интрузивами гранитоидов (Au–Bi, Sn–W, Mo–W- и Mo- жильно-штокверковый, 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, Тигринное, 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, энсиалические 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, Чуктуконское 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	Ичугеумская, Рывеемская, Берелехская, Чайнорьинская, Тирехтях, Одинокое, Млеловеем, Серовское, Красная шапочка, Баскунчак

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.

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.

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).

В таблице приведена краткая характеристика 8 главных рудообразующих систем высокотехнологичных критических металлов России: расслоенных интрузивов основных пород (магматическая базитовая и ультрабазитовая);

скарно–во–порфировая и порфирово–эпитеpмальная; орогенная (в том числе связанная с интрузивами гранитоидов); связанная с щелочными гранитами; ультраосновных–щелочных пород и карбонатов; колчеданно–вулканогенная и осадочно–вулканогенная; осадочных бассейнов; россыпей и кор выветривания. Расположение основных месторождений высокотехнологичных 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 тысяч 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 эпитеpмального в терригенных толщах типов – менее значимые для промышленности. При этом среди свинцово–цинковых месторождений миссисипский тип (MVT) насчитывает более 80, тип SEDEX – более ста, а колчеданный тип (VMS) – около двухсот объектов. На основе этой базы данных были составлены обзорные карты (Рис. 2 и 3).

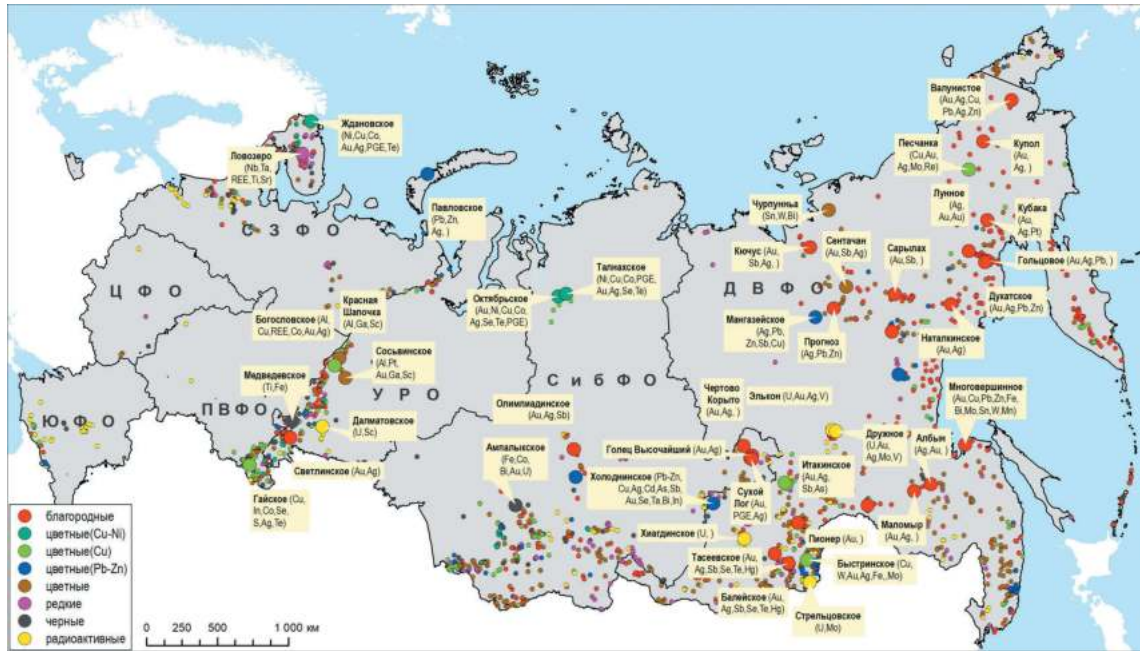


Рис. 2. Основные месторождения стратегических высокотехнологичных металлов РФ. Крупными значками показаны крупные месторождения, мелкими – мелкие и средние.

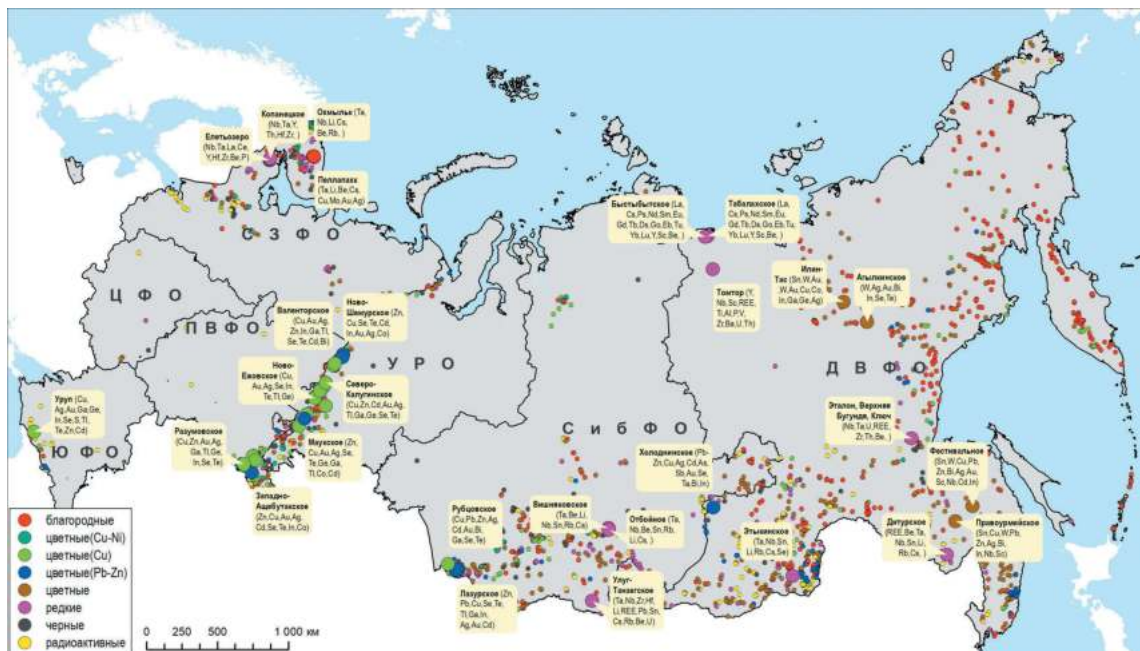


Рис. 3. Размещение комплексных месторождений стратегических металлов РФ. Крупными значками показаны наиболее комплексные месторождения, мелкими – остальные.

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 (рис. 3), 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 титаномагнетит–ильменит–ванадиевый. В химический состав руд месторождений перечисленных минеральных типов входят Ag, Al, 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 рис. 4.

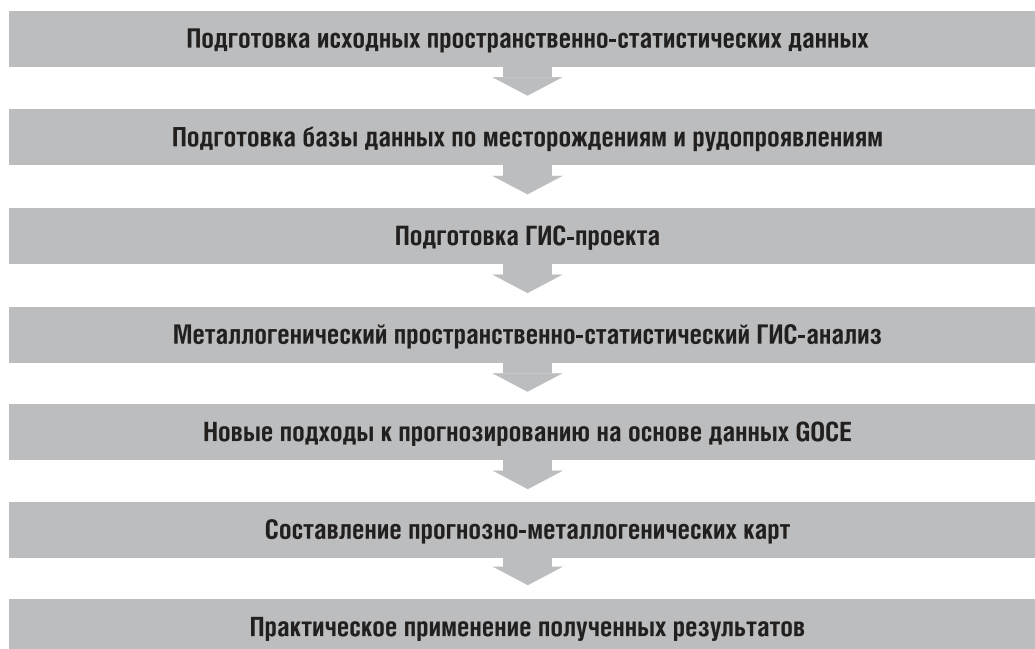


Рис. 4. Этапы прогнозирования и оценки крупных месторождений и перспективных рудопроявлений стратегических металлов.

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.

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, вариацией мощности, неоднородностью 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.

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 всего северного полушария Земли.

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 рудообразую-

щих системах предполагает выделение типовых областей – источников стратегических металлов, типовых геодинамических блоков земной коры, проницаемых 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. 5).

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 коры (рис. 5). 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 Вилюйской 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 эксгальционными рудами (SEDEX) – над наиболее

изменчивыми по мощности участками нижней и средней коры. Расположение этих потенциально перспективных областей показано на рис. 6. Учитывая непрямой характер признака, следует рассматривать его лишь как косвенный инструмент для совместного использования с прямыми признаками (коренные проявления руд и геохимические аномалии).

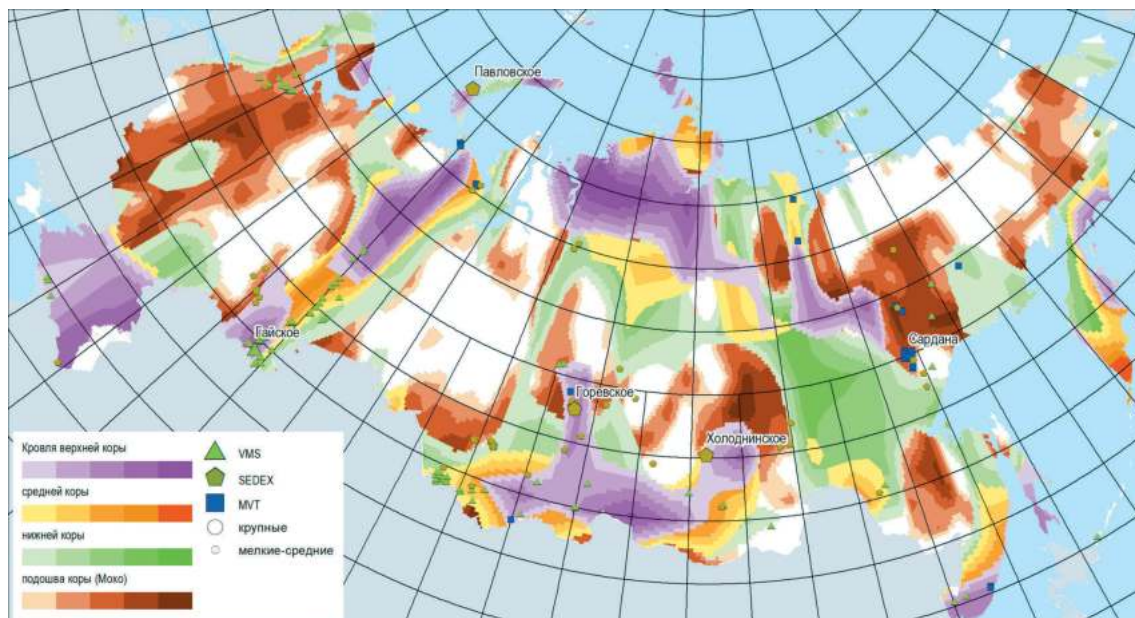


Рис. 5. Размещение Pb–Zn–месторождений MVT, SEDEX и VMS на фоне сочетаний дислоцированных областей коры по границам Мохо, Конрада (нижнего), ее среднего и верхнего слоев. Составлена на основе модели CRUST1.0

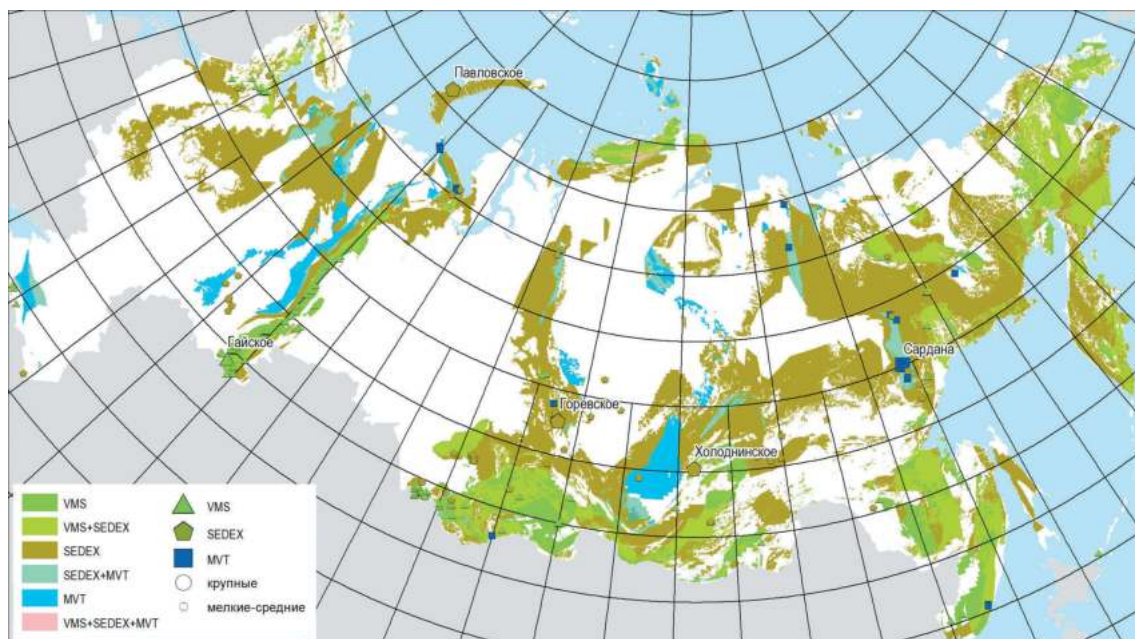


Рис. 5. Сводные признаки на выявление новых Pb–Zn–месторождений MVT, SEDEX и VMS.

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 строение 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. 5).

Следующий этап в развитии представлений о перспективности и распространении региональных рудообразующих систем, состоит в 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 глубинной 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 разрешение 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 № 13.1902.21.008, соглашение 075–15–2020–802).

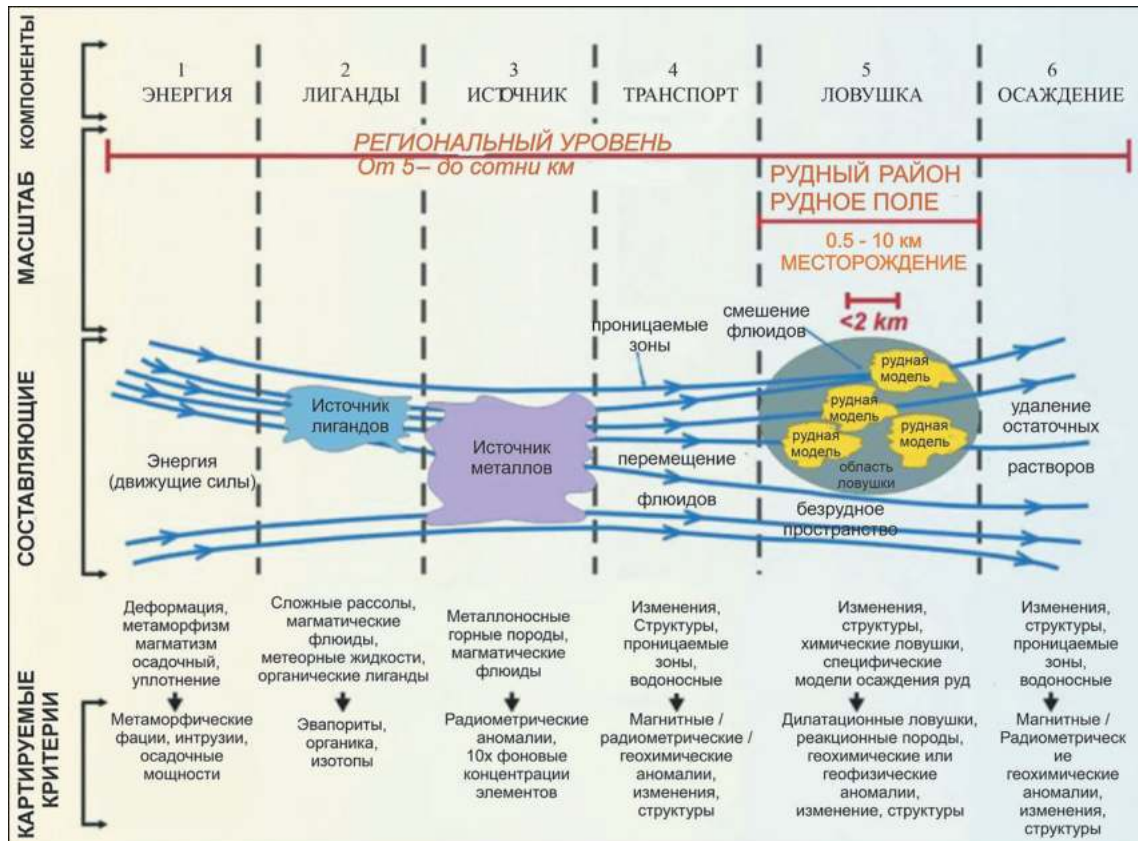


Рис. 1. Концепция рудообразующей (минеральной) системы, модифицировано из (Hagemann et al., 2000, 2016).

ЛИТЕРАТУРА

- 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.
- Волков А.В., Галямов А.Л., Савчук Ю.С. Применение моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии, созданных на основе гравитационных данных спутника GOCE, в металлогеническом анализе // Исследование Земли из космоса. 2020. № 4. С.41–50.
- 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.
- Artemieva, I.M., Meissner, R., 2012. Crustal thickness controlled by plate tectonics: a review of crust–mantle interaction processes illustrated by European examples. *Tectonophysics* 519, 3–34.
- Hagemann, S.G., Cassidy, K.F. Archean orogenic lode gold deposits, in *Gold in 2000 // Reviews in Economic Geology*. 2000. Vol.13. P. 9–68.
- Hagemann, S.G., Lisitsin, V.A., Huston, D.L. Mineral system analysis: Quo Vadis // *Ore Geology Reviews*. 2016. Vol. 76. P. 504–522.
- Joly, A., Porwal, A., McCuaig, T.C., Chudasama, B., Dentith, M.C., Aitken, A.R.A., Mineral systems approach applied to GIS-based 2D-prospecting modeling of geological regions: Insights from Western Australia // *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 71. P. 673–702.
- 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, 15. EGU2013–2658.
- Pirajno, F. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer, 2009, 1250 p.