

Система моделей объектов неметаллических полезных ископаемых при решении геологоразведочных задач (на примере фосфоритовых объектов)

Р.Ф.ВАФИН, М.И.КАРПОВА (ЦНИИГеолнеруд)

Методологическая база прогноза, поисков и оценки твердых полезных ископаемых в последние годы дополнилась новым эффективным направлением исследований — моделирование рудных объектов и формирующих их процессов.

Модельные методы в науке о полезных ископаемых с начала 90-х годов XX в. успешно развивались в ЦНИИГРИ под руководством А.И.Кривцова, в результате чего был создан Атлас специализированных (многофакторных, градиентно-векторных, параметрических, геолого-генетических, прогнозно-поисковых) моделей месторождений алмазов, благородных и цветных металлов [4, 5].

Модельные построения объектов недр с неметаллическими полезными ископаемыми (фосфориты, апатиты, калийные соли, барит, графит и др.) для решения научно-методических задач широко используются в ЦНИИГеолнеруд [2, 6]. Представление природных рудных объектов (потенциальные месторождения, прогнозные площади, минерагенические таксоны) и рудоформирующих процессов в виде модельных конструкций при выполнении федеральных заказов по научно-методическому обеспечению работ на различных стадиях геологоразведочного процесса (прогноз, поиски, оценка, разведка) и исследовании конкретных объектов в отдельных регионах, помогают оперативно и с высокой эффективностью делать выбор наиболее перспективных объектов, оценивать на них качество минерального сырья и определять рациональный комплекс методов при проведении поисково-оценочных работ.

Модельная методология предусматривает построение различных типов моделей, объединяемых в многоуровневую систему. Структура моделей, входящих в систему, слагающие их компоненты (факторы) определяются прежде всего, производственными задачами — стадиями геологоразведочных работ (прогноз, поиски, оценка, разведка). Каждой стадии соответствуют свои критерии оценки объекта и, следовательно, качественно и количественно различные характеристики элементов модели, определяемые масштабами исследуемого рудного объекта — от минерагенических бассейнов, областей и районов на прогнозно-поисковых стадиях до рудных полей, участков и месторождений на оценочной и разведочной стадиях геологоразведочных работ. По типу построения, характеру исходных информационных материалов можно выделить две группы (или системы) моделей: аналитические и аналоговые. Аналитические — научно-методическое средство при проведении прогнозных и регионально-поисковых работ; аналоговые применяются преимущественно на стадии работ по оценке и разведке.

Основная региональная рудная система — седиментогенная, магматогенная или метаморфогенная — представляет собой крупный минерагенический таксон (провинция, бассейн) или его часть (область, зона), отвечающий определенной крупной тектонической структуре, сформированной на определенных историко-геологических этапах в специфических геодинамических условиях.

Внутренним частям такой системы эквивалентны системы рудных районов — территорий распространения продуктивных на конкретный вид полезного ископаемого формаций или ее частей, содержащих однотипные и одновозрастные месторождения или проявления того или иного промышленного типа. Элементы, составляющие эти системы, рассматриваются как региональные прогнозно-поисковые критерии и представляют прогнозно-поисковую модель рудной системы с определенным геолого-промышленным типом месторождений.

Изучение региональных рудных систем проводится на стадии регионального геологического изучения и прогнозирования полезных ископаемых с определением минерагенического потенциала и прогнозных ресурсов категории P_3 на крупных территориях. Этим задачам отвечает построение системы *аналитических моделей* минерагенических таксонов в ранге бассейнов, областей, зон, а также сопутствующих им минерагенических моделей геодинамических обстановок, продуктивных геологических комплексов, рудных процессов. В таких моделях основными элементами-факторами выступают: геодинамические обстановки, геологические комплексы, группы рудных формаций, а их неотъемлемое свойство — парагенность неметаллических полезных ископаемых, в т.ч. и с металлами. Под определением *аналитическая модель* в данном случае понимается такая конструкция, в которой не только описываются свойства и характеристики объекта, но в рамках соответствующих теорий выявляется сущность процессов, протекающих в исследуемом объекте.

Построение минерагенической модели крупных минерагенических подразделений на стадии регионального изучения и прогноза показано ниже на примере моделирования продуктивных геологических комплексов пассивных окраин континентов и одного из основных их элементов — фосфоритоносных бассейнов.

В геодинамических условиях формирования пассивных окраин, входящих в дивергентную группу структур, вследствие отсутствия или слабого проявления эндогенных, в т.ч. и магматических, процессов в формировании геологических комплексов указанных окраин, определяющим фактором геологического, в т.ч. и минерагенического, развития являлись осадочные бассейны. Формационные и литолого-фациальные особенности геологических комплексов осадочных бассейнов пассивных окраин континентов находятся в прямой зависимости от стадии развития данной окраины, пространственного расположения их на морфологических элементах — шельфе, склоне или подножии типа субстрата, питающего осадконакопление, гидрхимического состава вод бассейнов и климатических условий.

Эволюция рассматриваемых окраин в пространстве и времени существенно влияет на формирование широкого спектра полезных ископаемых, которые можно подразделить на три основные группы, образующиеся: 1) совместно с геологическими комплексами пассивных окраин континентов и имеющие резко выраженную стратиформность

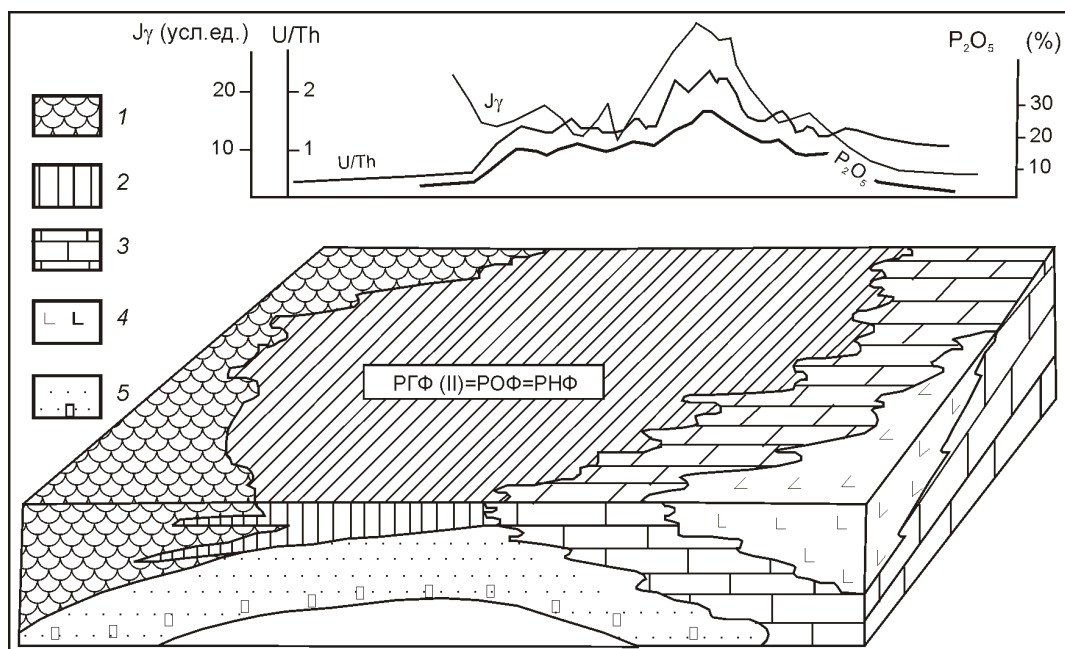


Рис. 1. Региональная геолого-генетическая модель бассейна микрозернистых фосфоритовых руд (по М.М.Язмиру) и диаграмма общих особенностей изменения содержания P_2O_5 , численного отношения U/Th в массе породы и интенсивности гамма-излучения J_γ (в условных единицах):

отложения: 1 — «черносланцевые», 2 — фосфоритоносные, 3 — карбонатные, 4 — карбонатно-эвапоритовые, 5 — подстилающие; РВФК — рудовмещающий фосфоритоносный комплекс, рудогенерирующая формация: РГФ I — ранняя (отражает образование периодически или в верхней части фосфоритовых желваков или прослоев), РГФ II — поздняя (отражает как седиментацию основной массы исходного фосфатного материала (зерен, корок), так и их перетотложение); РОФ — рудообразующая формация

(минеральные соли и фосфориты); 2) совместно с геологическими комплексами, но испытавшие эпигенетические преобразования, сохранившие стратиформность с элементами дискордантности (магнезит и барит); 3) на осадочном субстрате пассивных окраин континентов в более поздние стадии в результате наложения активных геодинамических режимов — субдукции, коллизии, эпиорогенной тектоно-магматической активизации; стратиформность рудных залежей таких полезных ископаемых слабо выражена (апокарбонатные тальк и хризотил-асбест). Происхождение всех этих полезных ископаемых так или иначе связано с процессами осадконакопления в бассейнах пассивных окраин континентов на разных стадиях их развития и они пространственно располагаются в различных областях латерального ряда формаций профиля таких окраин. Формирование галогенных бассейнов совпадает с начальной (рифтовой) стадией указанных окраин, накопление фосфоритов и высокомагнезиальных карбонатных пород, являющихся источником апокарбонатных магнезита, талька и хризотил-асбеста, происходило вместе с образованием «карбонатных платформ» в стадию трансгрессивного осадконакопления и общего прогибания в шельфовой мелководной области, концентрация барита характерна для батинальных зон континентального склона и подножия в условиях образования бассейнов с кремнистым профилем седиментации.

Минерагенетическая модель фосфоритоносных бассейнов. Как правило, фосфоритоносные бассейны пассивных окраин континентов образуются на стадиях трансгрессивного осадконакопления и общего прогибания (по классификации Б.В.Ермакова) [3]. Промышленные концентрации фосфоритов в них образуются главным образом в

шельфовой мелководной зоне в тропических широтах. Тип залежей, их протяженность, мощность и распределение содержаний P_2O_5 зависят от масштабов шельфовой зоны, гидродинамики и химизма водной среды. Морфология осадочных бассейнов, несущих фосфоритовое оруденение, достаточно разнообразна: 1) открытые в сторону океана обширные участки шельфа; 2) мелководные заливы- и проливнообразные повышено соленые окраинно-континентальные бассейны.

С карбонатными платформами пассивных окраин связано формирование фосфоритов преимущественно микрозернистого и зернистого геолого-промышленных типов. Геологические комплексы с фосфоритами микрозернистого типа относятся к стратиграфическому уровню протерозоя, венда, нижнего и среднего кембрия и перми и, таким образом, относятся к древним фосфоритоносными бассейнами. Синтезированная модель фосфоритоносного бассейна, специализированного на микрозернистые фосфориты, складывается из частных моделей крупнейших фосфатноносных бассейнов мира — Фосфория, Южно-Китайский, Джорджина, Хубсугульский. К числу типовых относится и Каратауский бассейн (рис. 1). Фосфоритоносные бассейны пространственно связаны с переходными зонами устойчивых платформенных сооружений и подвижных областей — окраин микроконтинентов (Каратауский и Окино-Хубсугульский бассейны, Горно-Шорский район), внутренними частями перикратонных прогибов (Прибайкальский район, Араваллийский бассейн, Джорджина и Фосфория).

Состав продуктивной формации может быть доломитовым, кремнисто-карбонатным и терригенно-кремнисто-карбонатным. Последовательность седиментации трансгрессивная. Латеральный ряд продуктивной формации: в на-

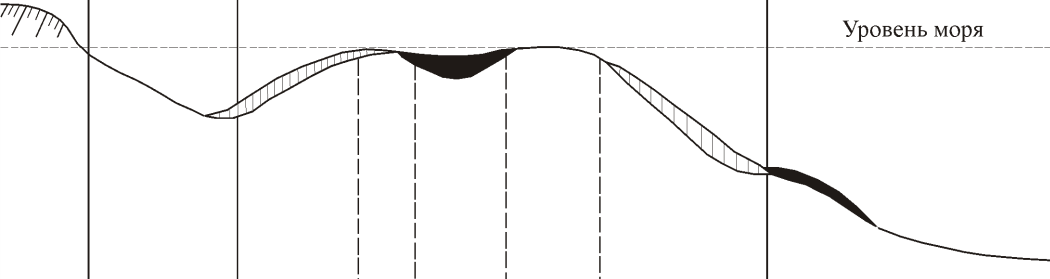
Фациальная зона	Суша		Прибрежно-мелководная			Мелководно-морская
Подзона	Островная		Отмельная			
						Уровень моря
Тип осадков			Микрозернистый биогермный	Афанитовый	Афанитовый микрозернистый	Афанитовый
Гидродинамический режим			Умеренный донотечный	Застойный	Мобильный от умеренно активного до застойного	Застойный
Масштаб рудонакопления			Месторождения средние		Месторождения средние и крупные	Месторождения

Рис. 2. Модель формирования залежей микрозернистых фосфоритов. По материалам А.И.Ильина, М.М.Язмира, В.С.Бойко

правлении шельфового прогиба она переходит в карбонатно-черносланцевую, а континента — в морскую эвапоритовую карбонатную соленосную (Джорджина), или терригенную соленосную (Фосфория). В большинстве случаев как продуктивные, так и над- и подрудные геологические формации дислоцированы. Поэтому взаимоотношения их друг с другом нарушены или закрыты и реконструируются по отдельным разобленным структурам. Характерная особенность фосфоритоносных отложений — присутствие в разрезе большого объема органического материала.

Особенности процесса формирования фосфоритоносных формаций в осадочных бассейнах шельфовой части пассивных окраин континентов хорошо отражает модель формирования залежей микрозернистых фосфоритов (рис. 2).

Четко выраженная фациальная зональность фосфатоносных бассейнов как в латеральном, так и вертикальном направлениях обуславливает достаточно устойчивые парагенетические связи фосфоритов с концентрациями других видов нерудного сырья и определенной группой металлов. По данным В.Н.Холодова [7], микрозернистые фосфориты представляют собой фацию трансгрессировавшего сероводородного палеобассейна, осаждавшего в районе интенсивной бактериально-водорослевой жизнедеятельности избытки элементов, накопленных в растворе, и, в первую очередь, SiO_2 , P_2O_5 и MnO . В подобном бассейне в мелководных участках будут осаждаться фосфаты, а во впадинах накапливаться черные металлоносные сланцы. Региональное трансгрессивное развитие фосфатоносного бассейна и локальный трансгрессивно-регрессивный механизм формирования отдельных его фрагментов обуславливают появление в разрезе фосфатоносной толщи, особенно в его верхах, значительного объема черносланцевых пород. В латеральном разрезе пассивной окраины мелководные участки карбонатной платформы на шельфе в сторону океана сменяются пелагическими участками, в которых формируются черносланцевые и графитоносные бассейны, специализирующиеся на промышленных концентрациях ванадия, золота, урана и др. На примере бассейна Каратау известно появление в верхах продуктивной фосфатоносной толщи железомарганцевого горизонта.

Таким образом, при региональной оценке геологических комплексов фосфоритоносных бассейнов большое прогнозно-поисковое значение имеют парагенетические связи фосфоритов с рядом металлов, концентрация которых может иметь промышленное значение. С самими фосфоритами связаны повышенные содержания U, V, Ba, Sr. Кроме них, характерен F и Sr, и такие нетипичные элементы как Re, I, Mo, Ag, As, Pb. В черносланцевых породах концентрируются V, U, Th, Ag, Au, Ni, Cr, Mo, Pb и Zn.

В региональном седиментационном ряду по латерали в направлении платформы фосфоритоносные формации часто переходят в эвапоритовую карбонатную (бассейн Джорджина) или терригенную соленосную (бассейн Фосфория), что обязательно должно учитываться при минералогической оценке регионов. Тем более, что эвапоритовые бассейны представляют собой начальный этап развития шельфа пассивных окраин и являются одним из главных звеньев в седиментационной триаде аридного шельфа пассивных окраин континентов: эвапориты—фосфаты—«металлоносные» черные и горючие сланцы.

На стадии поисков и оценки исследуются преимущественно рудные поля, охватывающие специализированные фациальные зоны или их части — поисковые участки, где имеются предпосылки для формирования месторождений. Элементы такой локальной рудной системы — локальные прогнозно-поисковые критерии и признаки, которые в со-

вокупности составляют модель потенциального месторождения того или иного геолого-промышленного типа.

На этих стадиях геологоразведочных работ, когда необходимо рассчитать рациональный комплекс методов поисков, оценить промышленное качество руд, установить морфологию и параметры рудного тела, оценить прогнозные ресурсы и запасы объекта, определить оптимальную плотность и размещение оценочной и разведочной сети, наиболее эффективным средством является создание *аналоговых моделей*. Аналоговые модели отражают свойства конкретных рудных объектов, включая в элементы своего строения необходимый оптимум характеристик, позволяющих эффективно решать поставленные задачи. Аналоговые модели могут быть обобщенными, отражающими некоторые общие свойства и характеристики типового месторождения-аналога одного геолого-промышленного типа (собирательный образ месторождения), или специализированными конкретными (поисково-оценочными), отражающими в зависимости от поставленной задачи отдельные факторы и компоненты рудной системы (морфологию рудного тела, технологические свойства руд, концентрацию рудного вещества и др.). Такой ряд моделей системы поисково-оценочной стадии типизирован в работах ЦНИГРИ, в которых выделены: геолого-промышленные, прогнозно-поисковые, морфометрические, концентрационные, градиентно-векторные и многофакторные модели [5].

Построение аналоговой модели типового месторождения неметаллов иллюстрируется на примере Ухагольского и Харанурского месторождений фосфоритов микрозернистого геолого-промышленного типа (рис. 3). Эти типовые для фосфоритов микрозернистого геолого-промышленного типа месторождения представлены мощными рудными телами моноклинального залегания протяженностью 4—25 км. Продуктивная толща (фоссерия) состоит из 2—4 пластов фосфоритов мощностью 1—30 м, разделенных пачками слабофосфатных кремнистых доломитов или фосфатно-карбонатно-кремнистых и кремнистых пород. В ее составе выделены 6 литокомплексов (см. рис. 3): 1) нижние известняки и доломиты D₁; 2) нижний фосгоризонт Ф₁; 3) сланцево-фосфатно-карбонатный горизонт ФКС; 4) верхний фосгоризонт Ф₂; 5) кремнистый горизонт К; 6) верхние доломиты и известняки D₂. Мощность фоссерии колеблется от 10 до 392 м, углы падения 30—70°. В пределах месторождений широко развиты разрывные и пликвативные дислокации низких порядков [1, 5]. Основное рудное тело — нижний фосфоритный горизонт, в котором сосредоточено до 75% запасов месторождений Окино-Китойского фосфатноносного района. Содержание P₂O₅ в нем колеблется от 9 до 22%, средняя мощность составляет 14 м. Фосфоритовые руды состоят из чередующихся доломитовых, кремнисто-известняково-доломитовых, гидрослюдисто-кремнистых и собственно фосфоритовых прослоек мощностью 0,5—2 см. В минеральную ассоциацию входят наряду с фосфатом кальция доломит, кальцит, халцедон, гидрослюды, образующие между собой тесные срастания. В рудных телах устанавливаются следующие формы обособлений фосфата кальция: в виде монофосфатных слойков и линзочек; микрозерен (пеллет) и оолитов размером 0,01—1 мм; бесформенных выделений и импрегнаций в карбонатных и кремнистых породах; псевдоморфоз по продуктам жизнедеятельности различных водорослей (строматолитам, онколитам). Фосфориты, в которых фосфатные компоненты представлены преимуще-

ственно зернами (пеллетами), относятся к собственно микрозернистым; те, в которых преобладает слойковая и лизовидная форма обособления бесструктурного фосфата — к афанитовым и афанитово-микрозернистым. Содержание P₂O₅ в фосфоритовых слоях изменяется в очень широких пределах от 5 до 30%, составляя в среднем 16—23%; CO₂ 10—30%, MgO 1,5—14%, SiO₂ 1,5—34,5%. Фосфориты труднообогатимы. Геохимическая особенность фосфоритовых руд — повышенные против кларка (10 кларков и более) содержания F, Sr, редкоземельных элементов, Ba, As (до 0,1%), Cu (до 0,3%), Cr (1—3%), Mn (до 3%). Естественная радиоактивность (α-акт) составляет: фосфоритов до 20—30, вмещающих толщ — 1,7. Магнитная восприимчивость пород (ед. СИ): перекрывающих — 126, фоссерии не магнитны, подстилающих — 1018.

Методы формализованного описания рудных объектов, применяемые при их моделировании позволяют широко применять в модельных построениях компьютерные тех-

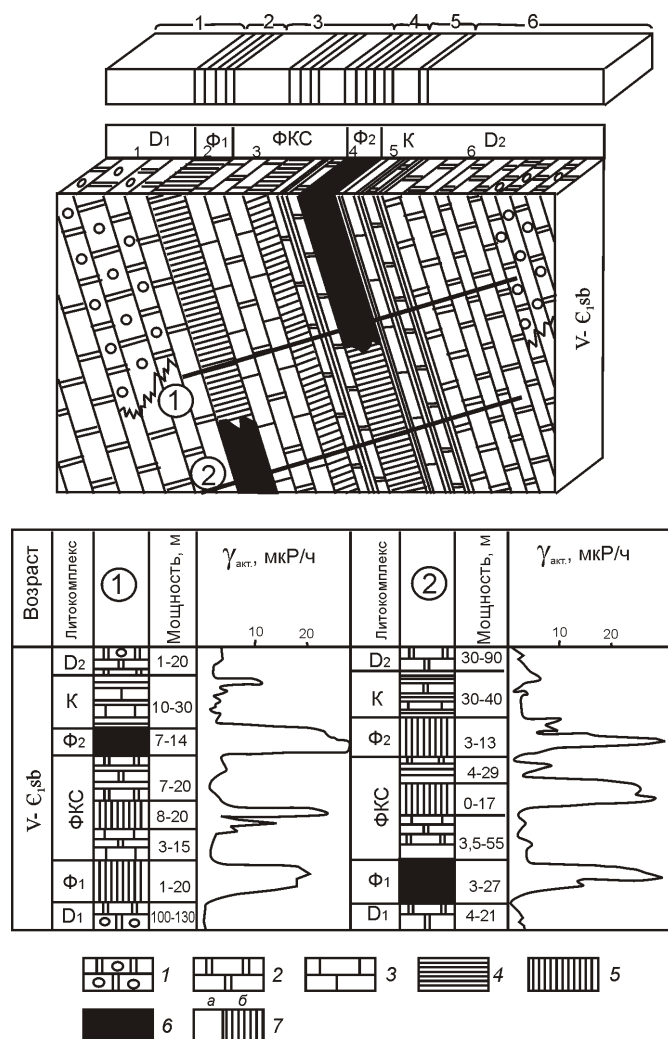


Рис. 3. Прогнозно-поисковая модель месторождений микрозернистых фосфоритов:

1 — доломиты брекчиевые; 2 — доломиты; 3 — известняки; 4 — сланцы кремнистые и кремнисто-карбонатные; фосфориты: 5 — микрозернистые, 6 — афанитово-микрозернистые и афанитовые; 7 — радиоактивность α-акт. (в МКР/ч): а — 1—10; б — 10—20 и 20; эталонные объекты (цифры в кружках): 1 — Ухагол, 2 — Харанур

нологии, которые обеспечивают информационное питание моделей в виде баз данных, создавать картографические и графические образы, проводить аналитические расчеты параметрических элементов моделей.

При информационном обеспечении аналитических моделей желательно применять базу знаний, содержащую сведения о геодинамических, тектонических, формационных, структурных, фациальных и других свойствах крупных минерагенических таксонов (бассейны, области, зоны, районы). Аналоговые модели сопровождаются при построении базами фактографических данных, имеющих более детальную структуру и содержащих большое количество параметрических данных, характеризующих локальные поисковые, оценочные и разведываемые объекты.

Для построения аналоговых многофакторных моделей месторождений и перспективных участков при проведении поисково-оценочных и разведочных работ на нерудные полезные ископаемые в ЦНИИГеолнеруд разработана автоматизированная компьютерно-аналитическая система ГИС-РАЗРЕЗ. Система предназначена для построения моделей локальных рудных объектов (месторождения, поисковые участки) на основе наблюдений различных свойств полезных ископаемых, их пространственного расположения, геометрии продуктивных толщ. Один из основных элементов системы — банк данных, структуру которого составляют:

общие сведения о рудном объекте, включая географическую привязку;

каталог скважин и горных выработок;

послойное описание разреза по скважинам и горным выработкам;

описание проб, отобранных по интервалам разреза;

результаты лабораторных анализов и технологических испытаний руд и вмещающих пород.

В картографическом блоке банка данных содержатся топопланы объектов, схемы расположения скважин и горных выработок, места отбора проб.

ГИС-РАЗРЕЗ позволяет путем моделирования решать следующие геологические задачи:

оценка соответствия руд требованиям промышленности к качеству сырья (ГОСТ, ОСТ и др.);

объемное оконтуривание рудного пространства (рудных тел) по критериям оценочных кондиций;

технологическое картирование рудного тела по срезам на различной глубине и по сортам в соответствии с ГОСТами;

оперативная (прикидочная) количественная оценка прогнозных ресурсов и запасов полезного ископаемого.

Приведенная компьютерная система была апробирована при поисковых и поисково-оценочных работах на ряде объектов каолинов (Южно-Ушкотинский участок), мелко-размерного мусковита (Саздинский участок), формовочных и бентонитовых глин (Березовское месторождение).

В заключение согласно изложенным материалам необходимо отметить следующее:

1. Модельные технологии в геологоразведочном процессе — эффективный инструмент для воспроизводства минерально-сырьевой базы неметаллов.

2. Модельные построения должны быть многоуровневыми и отвечать задачам стадийности проведения геологоразведочных работ: прогноз, поиски, оценка, разведка. Стадии регионального геологического изучения и прогнозирования полезных ископаемых отвечают аналитические модели минерагенических таксонов (бассейнов, областей, зон, районов). На поисково-оценочной и разведочной стадиях работ локальных объектов (рудное поле, перспективный участок, месторождение) наиболее эффективны аналоговые модели (обобщенные и специализированные).

3. При создании модельных конструкций рудных объектов большую роль играют компьютерно-аналитические технологии, в т.ч. автоматизированная система ГИС-РАЗРЕЗ, разработанная в ЦНИИГеолнеруд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бойко В.С., Карпова М.И., Михайлов А.С., Журавлев Ю.Д.* Геолого-технологические модели месторождений фосфоритовых руд. — М.: Недра, 1986.
2. *Дистанов У.Г., Аксенов Е.М., Ведерников Н.Н.* и др. Фанерозойские осадочные палеобассейны России: проблемы эволюции и минерагения неметаллов. — М.: ЗАО «Геоинформарк», 2000.
3. *Ермаков Б.В.* Пассивные континентальные окраины // Итоги науки и техники. Сер. Общая геология. Т. 9. 1980.
4. *Константинов М.М.* Система моделей месторождений благородных и цветных металлов и ее роль в воспроизводстве минерально-сырьевой базы // Руды и металлы. 2004. № 1. С. 27—33.
5. *Кривцов А.И.* Моделирование рудных месторождений — прикладное значение и геолого-генетические следствия. Обзор изданий ЦНИГРИ // Руды и металлы. 2005. № 1. С. 20—31.
6. *Прогнозно-поисковые комплексы геолого-промышленных типов неметаллических полезных ископаемых / Под ред. Н.Н.Ведерникова, А.С.Филько.* — М.: Недра, 1989.
7. *Холодов В.Н.* Эпохи фосфоритообразования и биогеохимия фосфора // Литология и полезные ископаемые. 1997. № 6. С. 563—577.
8. *Язмир М.М., Егоров П.А., Зарипова Т.Я.* и др. Окино-Китойский фосфоритоносный район и его перспективы // Методы поисков и разведки месторождений неметаллических полезных ископаемых. Обзор ВИЭМС. — М., 1987.