

Методология и пути развития научно-технологического обеспечения оценки недр на рудные полезные ископаемые

Рассмотрены проблемы научно-технологической поддержки геологоразведочной отрасли. Анализируются факторы, влияющие на восполнение и расширение минерально-сырьевой базы Казахстана и некоторых других стран. Подчёркивается необходимость соответствия научно-технологического развития мировому научному тренду: междисциплинарность, математизация, цифровизация. Рассмотрены основные сложности прогнозирования скрытых рудных объектов и методологические, физические, геологические аспекты этой операции. Предлагается базовая модель рудообразования и анализируется взаиморасположение рудных объектов в пространстве. Рассматривается концепция построения информационной модели геологического пространства (GSM). Показаны перспективные направления разработки технологии прогнозирования скрытых месторождений.

Ключевые слова: научно-технологическое обеспечение, рудные месторождения, металлогения, прогнозирование рудных объектов, междисциплинарность, математизация, цифровизация, самоорганизация, базовая модель рудообразования, распределение месторождений в пространстве, информационные модели, цифровое прогнозирование.

ЛОСЬ ВЛАДИМИР ЛЬВОВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник АМР РК, v_los@mail.ru

УЖКЕНОВ БУЛАТ СУЛТАНОВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, Президент АМР РК

Общественное объединение «Академия минеральных ресурсов Республики Казахстан» (АМР РК), г. Алматы

Development of scientific and technological support for subsurface assessment for ore minerals

V. L. LOS, B. S. UZHKENOV

Academy of Mineral Resources of Republic of Kazakhstan (AMR RK), Almaty

The problems of scientific and technological support of the geological exploration industry are considered. The factors affecting the replenishment and expansion of the mineral base of Kazakhstan and some other countries are analyzed. The need for the scientific and technological development compliance with the global scientific trend (cross-disciplines, mathematization and digitalization areas) is emphasized. The main difficulties related to forecasting of concealed ore deposits as well as methodological, physical and geological aspects of these activities are considered. A basic model of ore formation is proposed and the mutual spatial arrangement of ore deposits is analyzed. The concept of constructing an information geological space model (GSM) is considered. The prospective directions of developing the technology for concealed deposits forecasting are shown.

Key words: scientific and technological support, ore deposits, metallogeny, forecasting of ore deposits, cross-disciplines, mathematization, digitalization, self-organization, basic model of ore formation, distribution of deposits in space, information models, digital forecasting.

Проблемы, задачи и направления развития геологической оценки недр на рудные полезные ископаемые рассматриваются применительно к геологоразведочной отрасли Казахстана, для которого горно-металлургический комплекс (ГМК) является одной из главных и естественных основ экономики. И именно ГМК наряду с нефтехимическим, аграрным и некоторыми другими отраслями могут и должны стать «рычагами» диверсификации всей производственной сферы Казахстана с переходом на более высокий технологический уровень.

Что касается самого ГМК, то его эффективность и конкурентоспособность в первую очередь зависят от состояния минерально-сырьевой базы (МСБ), её разнообразия и качества. И хотя по потенциальному богатству своих недр минеральными ресурсами и их разнообразию Казахстан входит в группу стран мировых лидеров, ещё в 2002 г. отмечалось, что ситуация с МСБ по некоторым стратегическим металлам в Казахстане неудовлетворительная [24], а к настоящему времени она только осложнилась. В концепции развития геологической отрасли РК

до 2030 г. (принята в 2012 г.) фиксируется, что проведённые в последние десятилетия геологоразведочные работы государственного геологического изучения недр и по контрактам на недропользование не полностью восполняют погашенные запасы [6]. В той же концепции отмечается, что в Казахстане уровень научно-технологической поддержки геологоразведки как по качеству исследований, так и по их объёму снизился до критического уровня, и это одна из главных негативных причин недостаточной результативности геологоразведочной отрасли, особенно в сфере выявления новых рудных объектов.

1. Успешность восполнения, расширения и поддержания конкурентоспособности МСБ зависит от ряда факторов различной природы: уровня развития фундаментальных и прикладных научно-методических разработок, нормативно-правового обеспечения, государственных и частных инвестиций, системы управления, природных факторов (наличие полезных ископаемых на территории), подготовки профессиональных кадров, полноты и качества оценки недр (рис. 1).

Все факторы важны. Их влияние проявляется с разным временным лагом, сложно переплетается, и поэтому деградация любого из них приводит к снижению общей эффективности геологоразведочных работ. Например, в [15] рассматривается роль проектного управления в геологической отрасли, в [26] анализируется финансирование и нормативно-правовое обеспечение.

Приняв как аксиому высокий металлогенический потенциал территории Казахстана (хотя и эту аксиому желательно уточнить), а также пока ещё достаточную профессиональную компетентность персонала (многие считают её уже недостаточной), рассмотрим только полноту и качество оценки недр.

Качественное и полное изучение и оценка недр – достаточно дорогостоящие и длительные процессы.

Вкладывая средства в изучение и оценку геологических недр, надо отчётливо понимать, что такой вклад – это своего рода долговременный страховой полис, обеспечивающий при правильном использовании устойчивое развитие, в том числе развитие высокотехнологических производств и создание продуктивных рабочих мест.

Учитывая значительные риски работ по оценке недр и долговременность отдачи от вложенных средств, геологоразведка и особенно её научно-технологическое обеспечение могут и должны опираться на стабильные долгоживущие институты, ориентированные на фундаментальные ценности и не требующие немедленного превращения надежд и ожиданий в сиюминутную прибыль. Такими институтами могут быть уполномоченные государственные учреждения (если они постоянно не реорганизуются), фонды развития, крупные компании.

Полнота и качество оценки недр на рудные полезные ископаемые определяются **научно-методическим и технологическим обеспечением** геологоразведочных работ, которое зависит от общего уровня научных исследований. Это, по мнению авторов данной статьи, фундаментальная основа и главный фактор модернизации и развития геологической отрасли, которые должны соответствовать общемировому тренду развития науки и технологий – **междисциплинарности, математизации, цифровизации** – и затрагивать все аспекты оценки недр.

Научно-технологическое обеспечение геологоразведочной отрасли, геологоразведочных операций оценки недр, как и любых наукоёмких отраслей и операций, нуждается не в реализации отдельных разрозненных проектов, а в систематическом, непрерывном развитии и улучшении качества получаемых результатов. Процесс непрерывного повышения качества определяется циклом Деминга, осознание сути которого и использование в своё время позволили Японии почти с нуля выйти в мировые

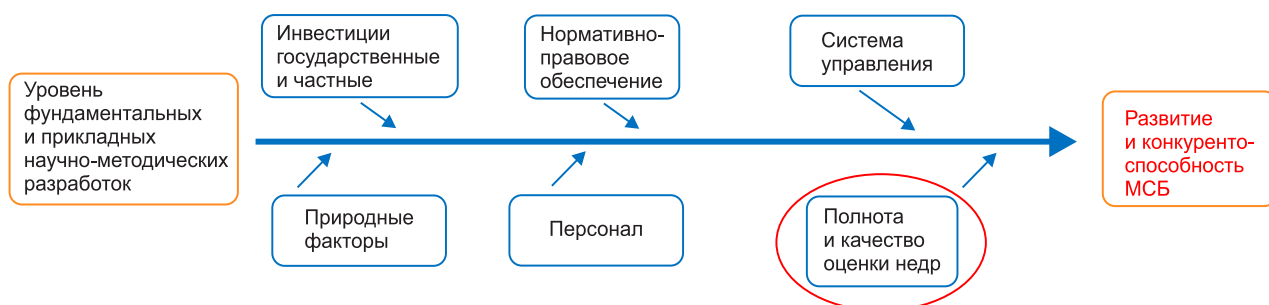


Рис. 1. Факторы развития и конкурентоспособности минерально-сырьевой базы



Рис. 2. Цикл Деминга

лидеры по качеству выпускаемой продукции и услуг. Цикл включает в себя планирование–выполнение–проверку–корректировку (исправление), что делает развитие постоянной компонентой отрасли, процесса, операции (рис. 2).

В данной статье рассматривается фаза планирования научно-методологического и технологического обеспечения геологоразведочных операций. В её рамках необходимо **определить возникшие проблемы, поставить цели и наметить меры по преодолению существующих проблем** с ориентацией на повышение полноты и качества оценки недр на рудные полезные ископаемые. Очевидно, что для реального развития и повышения качества результатов останавливаться только на фазе планирования нельзя.

Формируя планы стратегии и тактики научно-методологического и технологического обеспечения геологоразведочных операций, желательно исходить не из конъюнктурных интересов, привычных схем, сложившихся стереотипов. Необходимо опираться на объективный анализ реального состояния и тенденций геологоразведки, а также принципы инновационного развития, в частности, не только совершенствовать старое, но создавать и использовать новое.

2. Главной проблемой оценки недр на рудные полезные ископаемые является низкая эффективность выявления новых рудных объектов. Это связано с тем, что геологоразведочная ситуация постепенно, но коренным образом изменилась по сравнению с серединой XX века. В настоящее время очень мала вероятность выявления рудных объектов, выходящих на дневную поверхность, и результативность традиционных геологоразведочных ме-

тодов стала близкой к нулю. Выяснилось, что используемые традиционные геологоразведочные методы в новых условиях оказались недостаточно эффективными, и, как следствие, в настоящее время из 1000 участков, оценённых как потенциально перспективные, примерно на 1–2 десятках выявляются рудопроявления и только на одном значимое месторождение [26].

Существуют две базовые операции оценки недр на рудные полезные ископаемые: выявление новых рудных объектов (прогнозно-поисковые работы) и геолого-экономическая оценка месторождений (разведочные работы) (рис. 3). Конечная цель прогнозно-поисковых работ – выявление новых, неизвестных на момент проведения работ рудных объектов иерархического уровня (от рудных районов до месторождений); конечная цель разведочных работ – построение 3D-моделей месторождений, выделение рудных тел с подсчётом запасов и промышленно-экономическая оценка новых месторождений (или переоценка известных).

Первая операция основывается на взаимосвязи свойств геологической среды и представляет собой прямую геопризнаковую задачу, заключающуюся в переходе из одного признакового пространства в другое с его сжатием:

$$(x, y, z; \{t\}^n) \xrightarrow{f} (x, y, z; \{T\}^m),$$

где x, y, z – координаты ($x, y, z \in V$),

$\{t\}^n$ – пространство прогнозирующих (косвенных) характеристик,

$\{T\}^m$ – пространство целевых характеристик прогнозирования ($m < n$), а часто $m=1$,

f – оператор перехода (сжатия информации), то есть технологии прогнозирования.

На выходе прогнозно-поисковых работ резко уменьшается общее количество информации, но также резко возрастает её целевая ценность (по отношению к задаче прогноза). Одновременно производится и резкое сокращение размеров области прогнозно-поисковых работ V , в которой по значениям T выделяются перспективные площади V_p ($V_p \ll V$). В идеале площадь V_p обращается в точку или точки задания поисково-оценочных скважин.

В операциях разведки месторождений почти не меняется признаковое пространство (обычно это содержания полезных компонентов), но происходит расширение информации с помощью процедур интерполяции, экстраполяции и аппроксимации данных с развёрткой пространства из 0D в 3D.

В настоящее время особых проблем с геолого-экономической оценкой рудных месторождений нет, если не считать чисто экономических. Однако, с операцией выявления новых рудных месторождений в ситуации практически полного исчерпания фонда

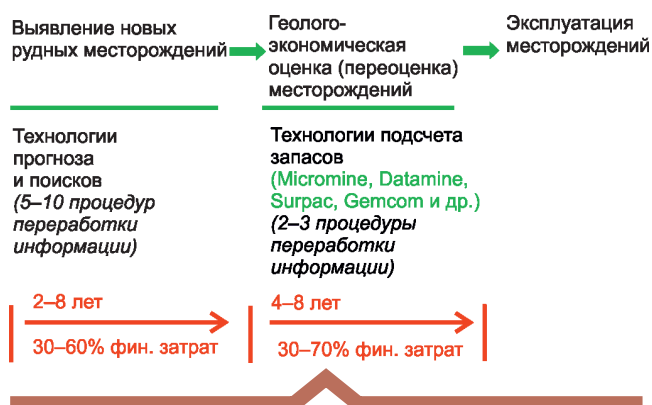


Рис. 3. Операции оценки недр на рудные полезные ископаемые

легкооткрываемых объектов дело обстоит гораздо сложнее, и здесь простое увеличение финансирования без качественного повышения уровня всех составляющих прогнозно-поисковых работ автоматически не приведёт к повышению их эффективности и продуктивности. Это определяется прежде всего **трудностью самой задачи прогнозирования скрытых рудных объектов**, решение которой связано с изучением и моделированием условий формирования и закономерностей размещения сложных диффузных нелинейных систем с самоорганизацией в неоднородной и нелинейной геологической среде.

Решение проблем оценки недр на рудные полезные ископаемые (точнее, движение по пути решения проблем) предполагает:

- построение *моделей* и получение *знаний* об основных свойствах рудообразующих систем и их поведении в различных условиях;
- владение *информацией* о недрах (первичных и вторичных характеристиках геологической среды и геологических систем), позволяющей в принципе решать задачу прогноза тех или иных типов полезных ископаемых с определённой надёжностью;
- существование и владение *технологиями*, преобразующими знания и информацию в прогнозную оценку недр.

Теоретико-методологические, информационные и методико-технологические задачи обеспечения оценки недр на рудные полезные ископаемые тесно переплетаются между собой, в связи с чем эффективное продвижение по пути решения поставленных задач возможно лишь путём их совместного развития и использования. Развитие теории рудообразования практически невозможно без использования представлений и моделей других наук (прежде всего физики, химии), математического и компьютерного

моделирования механизмов рудообразующих процессов (включая мобилизацию, перемещение и отложение рудного вещества). Надо понимать, что, подходя к фундаментальным основам любой науки, уже не обойтись без математики, физики, химии, продолжая опираться лишь на обыденные представления и «здоровый смысл».

Пока, к сожалению, авторы вынуждены констатировать, что научные исследования, призванные обеспечить теоретико-методологические и технологические основы оценки недр на рудные полезные ископаемые, не имеют стратегических целей, разрознены и не системны. В них практически отсутствует междисциплинарность, совершенно недостаточно используются результаты фундаментальных наук и широкие возможности математического и компьютерного моделирования рудообразующих процессов, систем и объектов. Информационную основу прогнозно-поисковых работ продолжают составлять традиционные, недостаточно формализованные характеристики, которые редко преобразуются в математические поля и, вероятно, в принципе не могут существенно повысить эффективность прогнозно-поисковых работ. Что касается собственно прогноза, то мы продолжаем в основном опираться на субъективные экспертные оценки (что не всегда плохо!) и полностью прекратили разработки собственных прогнозно-поисковых технологий (их методологии, алгоритмов и программ), хотя в 1970–1980 годы были лидерами в этой сфере. Заметим, что надежды на трансферт зарубежных технологий не оправдались.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время развитие научно-методологического и технологического обеспечения геологоразведочных работ должно ориентироваться, то есть использовать соответствующие знания, информацию и технологии, на выявление рудных объектов с низким статусом открываемости: глубокозалегающих, перекрытых аллохтонными образованиями (рыхлыми отложениями, базальтами и др.), не имеющих явных индикативных признаков на поверхности.

3. Цели и основные аспекты развития научно-методологического и технологического обеспечения оценки недр включают ряд аспектов.

Целью развития научно-методологического и технологического обеспечения оценки недр на рудные полезные ископаемые является *формирование предпосылок и условий для устойчивого восполнения, развития и поддержки конкурентоспособности минерально-сырьевой базы Казахстана*.

В качестве **базовой аксиомы прогнозной оценки недр на рудные полезные ископаемые** можно принять следующее положение: *рудные объекты (месторождения, рудные поля, рудные узлы, рудные районы)*

являются не случайными, а специфическими геологическими образованиями, которые органично присутствуют в земной коре и протекающим в ней процессам перераспределения вещества. Несмотря на кажущуюся простоту и тривиальность, данная аксиома ставит под сомнение металлогенические построения, основанные на случайном совмещении факторов, их механистическом сложении (факторы надо не складывать, а «взвешивать» и структурировать) или использовании гипотез *ad hoc* (гипотез «для данного случая»), типа «впрыскивание» металлов с больших глубин (хотя последнее не исключается).

Методологический аспект научно-технологического обеспечения оценки недр должен основываться на преобладающем типе поведения изучаемых систем или типе поведения, представляющем наибольший теоретический или прикладной интерес для решения конкретных задач. В металлогении наибольший интерес представляют системы и процессы с самоорганизацией, так как именно они обеспечивают структурное усложнение систем с понижением их энтропии, формирование устойчивых объектов в разнообразных условиях (именно к таким системам и объектам относятся рудообразующие системы и рудные месторождения) [5, 9, 12, 14, 19].

Явление самоорганизации в очень упрощённом виде можно пояснить как тип поведения систем в координатах воздействие (на систему)–результат (изменение системы) (табл. 1).

Самоорганизационные процессы запускаются при конкуренции противоположных тенденций. Для геологической среды это могут быть диссипация и подвод тепла, электромагнитное отталкивание и притяжение частиц, растворение и осаждение, десорбция и сорбция, диффузия вещества (увеличение энтропии) и его концентрация (минимизация свободной энергии), деструкция сложных молекул и полимеризация (кластеризация), плавление и кристаллизация и др. Самоорганизация приводит к необратимому структурированию среды, что, в свою очередь, ведёт к углублению и ускорению структурирования.

Принятие мировоззренческой модели самоорганизации в металлогенических системах влечёт изменение методологии их изучения и интерпретации. Во-первых, необходимо учитывать пространственно-временную *автономизацию систем с самоорганизацией*. Автономизация происходит на всех иерархических уровнях и приводит к появлению ячеистых (мозаичных) и ритмичных структур. Автономизация указывает на то, что главное внимание нужно уделять внутренним особенностям, внутренней логике развития систем, хотя внешние причины в отдельных случаях могут быть решающими (особенно для разрушения систем). Во-вторых, желательно

отказаться от чисто детерминированных и(или) вероятностных схем и моделей образования и развития систем. В-третьих, нужно признать *отсутствие доминантных факторов*, влияющих на развитие систем с самоорганизацией. Главное не сила влияния какого-то фактора, а правильная архитектура воздействия на систему (среду). В-четвёртых, необходимо обратить внимание на *нелинейные связи* (внутренние и внешние) и особенно на дискретную нелинейность и режимы с обострением. Отметим, что фиксировать нелинейные связи и эффекты можно только при использовании для описания свойств систем сильных шкал измерения (шкалы интервалов, отношений). И в-пятых, для систем с самоорганизацией существует *несколько путей развития* и поэтому их моделирование должно быть многовариантным.

Физическим аспектом формирования и размещения рудных объектов в геологической среде, а следовательно, и оценки недр на рудные полезные ископаемые является представление о перемещении, дифференциации, ассоциации химических элементов, которые характеризуются когерентным, самосогласованным поведением. Системы с таким поведением составляющих их элементов описываются на основе принципов синергетики и приводят к возникновению разномасштабных стационарных состояний, формированию широкого спектра диссипативных структур и низкоэнтропийных объектов. Перераспределение элементов происходит при иерархическом структурировании геологической среды в результате протекания в ней локально неравновесных процессов. Именно в таких условиях могут возникнуть устойчивые закономерности (связи) между элементами, структурами, свойствами и формироваться диссипативные структуры (рудные месторождения – типичные диссипативные структуры) [8, 13]. При этом сами рудные объекты можно рассматривать как специфические диссипативные структуры, атрибутивными признаками которых являются повышенные концентрации металла или металлов, представленные в форме определённых минералов.

Геологическим аспектом оценки недр на рудные полезные ископаемые является использование наработанных способов описания, вычленения, анализа объектов геологического пространства. Эти операции производятся по данным анализов содержания элементов, определениям минерального состава, картированию распределения горных пород, выделению по каким-то правилам формаций, зон, районов, замерам геофизических полей и др. Геологические основы оценки недр на рудные полезные ископаемые на разных масштабных уровнях рассмотрены в большом количестве работ [7, 21, 22, 27, 30, 31 и др.].

1. Типы поведения систем

Воздействие	Результат	
	Неспецифический	Специфический
Неспецифическое	Хаотичное	Самоорганизационное
Специфическое	Вероятностное	Детерминированное

Операционным аспектом оценки недр на рудные полезные ископаемые и особенно собственно прогнозной оценки являются выявление и описание взаимосвязи (корреляции) свойств (характеристик) геологической среды. Здесь используется фундаментальный принцип: *корреляция кодирует информацию*. Применительно к прогнозированию рудных полезных ископаемых принцип корреляции означает выявление и описание силы и формы взаимосвязи целевых характеристик прогнозирования (T) с «косвенными» (прогнозирующими) характеристиками (t) геологической среды. Формально в наиболее общем виде существование связи определяется следующим соотношением:

$Q(T|t_i) = Q(T)$ при всех t_i – связи нет,

$Q(T|t_i) \neq Q(T)$ при любых t_i – связь существует,

где $Q(T)$ – параметры (среднее, мода, дисперсия, ...) распределения характеристики T ; $Q(T|t_i)$ – условные параметры распределения характеристики T в интервале i значений характеристики t .

Важным основанием прогнозной оценки недр является **экономический аспект**, который часто остаётся без внимания или приносится в жертву «комплексности» и(или) «опережающим исследованиям», оставшимся от времён «затратной» геологоразведки. Экономичность приближённо равняется количеству новой информации об объектах прогнозирования на единицу затрат (например, затрат на 1 км²). Количество информации зависит от числа новых примерно ортогональных друг другу фиксируемых характеристик геологической среды и силы их взаимосвязи с целевыми характеристиками прогнозирования. Заметим, что «комплексность», под которой понимается получение информации различными способами (визуальным, аналитическим, приборным), давно пора заменить на «системное описание». Последнее предполагает получение информации для описания систем, объектов или процессов с разных позиций (вещественных, структурных, геометрических, физико-химических) и с учётом их принадлежности системам более высокого порядка и возможного разделения на подсистемы более низкого уровня.

4. Теоретической основой, базовой металлогенической моделью рудообразования может служить простая и ясная схема перераспределения элементов в геологической среде «на месте». Эта модель в той

или иной степени способна согласовать и объединить разные металлогенические гипотезы и представления [7, 11, 19–21].

Несмотря на значительное разнообразие геологических обстановок, перераспределение элементов осуществляется по одной схеме: мобилизация (перевод рудных элементов в подвижное состояние)–миграция (перемещение в пространстве)–отложение (перевод в неподвижное состояние). В данном контексте термин «на месте» понимается как пространственная ассоциация и даже перекрытие областей выноса и зон накопления элементов. Области мобилизации и выноса элементов (V_m), пути миграции и зоны отложения с накоплением V_s (в частном случае зоны образования руд) фиксируются отрицательными и положительными аномалиями рудообразующих и других элементов, которые в совокупности образуют *рудообразующие (металлогенические) системы*. Металлогенические системы рудных объектов разных иерархических уровней имеют следующие типичные размеры: рудные провинции ($n \times 10^5 - n \times 10^6$ км²), зоны ($n \times 10^4$ км²), районы ($n \times 10^3$ км²), узлы ($n \times 10^2$ км²), поля ($n \times 10$ км²), месторождения ($n \times 10^0$ км²) (иерархическая градация рудных объектов даётся по А. А. Головину).

Системы разных масштабных уровней (рудных районов, узлов, месторождений) как матрёшки вкладываются друг в друга. Например, в зоне накопления системы иерархического уровня «рудный район» могут находиться несколько рудообразующих систем ранга «рудный узел», включая более локальные зоны накопления и области выноса.

Неспецифическим воздействием (см. табл. 1), движущей силой, приводящей к перераспределению элементов и структурированию полей концентрации элементов в геологической среде (в том числе приводящих к образованию рудообразующих систем и рудных объектов), являются различные по способам образования и размерам *естественные электрические поля* [2, 29].

Задачи выделения металлогенических систем достаточно сложны, не всегда однозначны, иногда практически невозможны, но в принципе системы могут быть описаны следующими характеристиками:

- размерами и формами V_m и V_s ;
- распределением концентраций перемещаемых элементов в V_m и V_s ;
- распределением форм нахождения элементов в V_m и V_s ;
- степенью извлечения (α_m) и накопления (α_s) элементов в V_m и V_s ($\alpha_m = C_m/C_k$; $\alpha_m < 1$; $\alpha_s = C_s/C_k$; $\alpha_s > 1$; где C_m, C_s – оценки средних концентраций в V_m и V_s ; C_k – оценённое значение кларковой концентрации элемента в районе расположения V_m и V_s);

• массой мобилизованного (M_m) и переотложенного (M_s) элемента ($M_m \approx M_s > M_0$ ($C > C_b$), где M_0 – масса элемента в концентрации выше заданной (C_b). Обычно для рудных узлов и рудных полей M_0 ($C > C_b$) $\approx 0,05-0,2 M_s$, то есть 5–20% мобилизованного и переотложенного элемента концентрируется собственно в месторождениях.

Возможности практического использования модели металлогенической системы связаны с взаиморасположением областей мобилизации и отложения рудного вещества. В настоящее время существует тенденция помещать области мобилизации элементов на большие, недоступные непосредственным наблюдениям глубины и (или) однозначно сопоставлять их с какими-либо масштабными геологическими процессами (объектами): интрузивным и вулканоогенным магматизмом, глубинными подвижными зонами и др. Потенциальные возможности этих масштабных процессов для тонкой дифференциации вещества как необходимого условия рудообразования представляются не всегда очевидными. Если принять гипотезу о глубинном источнике руд за «очевидную истину», то модель перераспределения теряет функциональный прикладной смысл, так как относительно области V_m можно строить самые широкие и, главное, не проверяемые фактами предположения (на существующем уровне знаний и технических возможностей). В таких условиях для каждого значительного рудного объекта (рудного узла, крупного и даже среднего месторождения) приходится вводить специальную систему гипотетических «специальных условий» adhoc (на данный случай). Хотя, конечно, нельзя отрицать привнос элементов с больших глубин при формировании литосферы, который и определил её металлогеническую специализацию [10].

Наиболее наглядным фактом применимости гипотезы образования рудных объектов в результате перераспределения элементов в земной коре «на месте» является то, что рудные объекты, особенно крупные, в пространстве тесно ассоциируют с областями пониженных концентраций основных металлов, которые интерпретируются как зоны мобилизации и выноса вещества. Соответствующие примеры рассмотрены в [3, 18, 23, 28, 29].

5. Организация и закономерности расположения в пространстве рудных объектов различного иерархического уровня (месторождения, рудные узлы, рудные районы) всегда привлекали внимание геологов. В большинстве случаев то или иное положение в пространстве рудных объектов объясняется и связывается с какими-либо геологическими телами или структурами. Принимая во внимание, что металлогенические (рудообразующие) системы явля-

ются системами с самоорганизацией и что таким системам (и это очень важное следствие!) присуща значительная **автономизация**, имеет смысл рассмотреть организацию размещения рудных объектов, опираясь на закономерности их взаиморасположения в пространстве.

Анализ пространственного взаиморасположения рудных объектов можно проводить с методом вычисления средних кратчайших расстояний между объектами (R) и сравнивать его со средним кратчайшим расстоянием между соответствующим числом случайно расположенных в пространстве точек ($R_{сл}$). Если отношение $R/R_{сл} > 1$, то объекты имеют тенденцию к «разбеганию» в пространстве; если $R/R_{сл} < 1$, то имеется тенденция группирования (скупивания) объектов; $R/R_{сл} \approx 1$, то взаиморасположение объектов не отличается от взаиморасположения случайных точек. Вычисления R и $R_{сл}$ проводились с помощью программы NextPoint, входящей в программный комплекс ELAN_W [16]. Результаты вычисления средних кратчайших расстояний между месторождениями Казахстана приведены в табл. 2. Как видим, для месторождений всех рассмотренных металлов $R/R_{сл} < 1$, что является количественным статистическим описанием степени их группирования и соответствует сформулированному Ф. А. Усмановым принципу группирования (скупивания) эндогенных месторождений [25]. Полученная закономерность подтверждает давно известное правило «ищи руду около руды».

Пространственное группирование месторождений естественным образом приводит к образованию рудных (металлогенических) объектов более высокого иерархического уровня: рудных узлов, районов (однозначного наименования и чёткого способа оконтуривания эти объекты пока не имеют).

Для построения рудных объектов более высокого иерархического уровня, чем месторождения, воспользуемся методом построения моделей плотности оруденения, которая вычисляется с помощью следующего функционала [18]:

$$D_j(x, y) = \sum_{i=1}^k \{M_{ji} / [1 + \beta(r/\gamma)^a]\},$$

где $D_j(x, y)$ – плотность оруденения металла j в точках с текущими координатами x, y ($x, y \in V$, где V – область моделирования);

M_{ji} – размеры (запасы) i месторождения j металла;

k – число месторождений j металла;

r – евклидово расстояние между i месторождением (его координаты x_i, y_i) и точками с текущими координатами x, y ;

α, β, γ – параметры, регулирующие вид модели D (в частности, радиус эффективной «генерализации» $Re = \gamma$, при $\beta = 1$).

При построении моделей плотности оруденения по территории Казахстана и Средней Азии в качестве показателя размеров месторождений использовались запасы металлов в них. Брались только крупные и средние по запасам месторождения, так как мелкие на получаемую картину плотности оруденения практически никакого влияния не оказывают. Параметры модели подбирались эмпирически так, чтобы радиус эффективной генерализации (Re) примерно соответствовал среднему кратчайшему расстоянию между месторождениями, то есть расстоянию между месторождениями в местах группирования (сгущения). В данном случае, если расстояние измеряется в километрах, это соответствует параметрам $\alpha=3$, $\beta=1$, $\gamma=70$, а $Re \approx 50-80$ км. При уменьшении степени генерализации ($Re < 40-50$ км) появляется много эпицентров, часто соответствующих отдельным крупным месторождениям; при увеличении степени генерализации ($Re > 120-150$ км) эпицентры начинают размываться, сливаться, а поля D_j теряют структурность, представляя собой фрагмент структуры более высокого иерархического уровня.

Несколько упрощённая картина распределения крупных эпицентров плотности оруденения (рудных районов) на территории Казахстана и Средней Азии показана на рис. 4.

Средние кратчайшие расстояния между выделенными на моделях эпицентрами плотности металлов приведены в табл. 3. Для всех металлов $R/R_{cl} > 1$, то есть средние кратчайшие расстояния между рудными объектами этого иерархического уровня больше, чем средние кратчайшие расстояния между случайно расположенными точками, что свидетельствует о «разбегании» эпицентров плотности оруденения (предельным случаем «разбегания» является расположение объектов в узлах какой-то равномерной регулярной сетки). Как видим, для этого иерархического уровня закономерности пространственной организации в размещении рудных объектов противоположны закономерностям в пространственном размещении собственно месторождений.

Закономерность «разбегания» согласуется с базовой металлогенической моделью рудообразования в результате перераспределения элементов «на месте» и указывает на правильность и необходимость использования не только принципа «ищи руду около руды», но и противоположного – «ищи руду *вдали от руды*». Закономерности пространственной организации размещения рудных объектов и прежде всего закономерности, связанные с «разбеганием» рудных районов (узлов), уже сейчас можно использовать для выявления потенциально перспективных площадей. Такими площадями являются «незанятые вакансии», расположенные на расстоянии R (см. табл. 2)

от 2–3 эпицентров плотности, соответствующих рудным районам (узлам). Некоторые из таких «незанятых вакансий» на территории Казахстана и Средней Азии показаны на рис. 4.

Отметим, что выявленные закономерности размещения рудных объектов не согласуются (или согласуются плохо) с традиционными интерпретациями, которые основаны на локальных геологических, геофизических, геодинамических и других особенностях вмещающей рудные объекты среды. Автономность рудных систем относительно региональных геологических структур хорошо видна при сопоставлении минерагенической карты Казахстана (масштаб 1:1 000 000) [4] с выделенными и показанными на рис. 4 рудными районами (рис. 5). Конечно, положение каждого отдельного района объясняется конкретной геологической (геодинамической) обстановкой, но это всего лишь гипотезы «для данного случая», и целостного объяснения всей картины распределения рудных районов Au, Cu, Fe, Mo, Sn, W, Zn и Pb для территории Казахстана пока нет.

6. Информация о недрах, на основе которой решается задача оценки недр на рудные полезные ископаемые, представляет собой набор характеристик геологической среды, измеряемых (оцениваемых) с помощью различных методов. Новые знания для обеспечения оценки недр на рудные полезные ископаемые, получаемые при научно-методологических исследованиях, с прикладных позиций нужны в основном для выявления характеристик геологической среды, необходимых для прогноза, поисков и оценки рудных объектов. Одновременно сами знания опираются на характеристики геологической среды, традиционно используемые в геологоразведке, и, по которым накоплен определённый объём информации.

Из рассмотренной выше базовой модели рудообразования вытекает достаточно очевидное следствие: наиболее простыми, фундаментальными и информационно важными характеристиками геологической среды при прогнозе и поисках рудных объектов являются концентрации химических элементов. Картирование полей концентрации элементов и особенно полей концентрации подвижных форм элементов является наиболее прямым и естественным направлением прогнозирования и поисков рудных объектов. Важно, что концентрации элементов являются настоящими физическими величинами, допускающими их объективное измерение, формализованное описание, демонстрацию воспроизводимости, определение систематических и случайных отклонений. Сами рудные месторождения представляют собой участки геохимического поля с резко повышенными содержаниями рудных элементов, и отсюда ясно,

2. Средние кратчайшие расстояния между месторождениями Казахстана

Месторождения	Класс крупности	Число объектов	R	$R_{сл}$	$R/R_{сл}$
Au	К	63	40	86	0,44
Cu	К	31	62,8	135,9	0,46
Pb+Zn	К	49	49	99	0,50
Fe	К+С	48	45,5	79	0,51
Mo	К	26	98	144	0,66
W	К	7	135,9	336,7	0,40
	К+С	20	94,7	163,2	0,58

Примечание. К – крупные объекты; С – средние объекты; R – средние кратчайшие расстояния между объектами (км); $R_{сл}$ – средние кратчайшие расстояния между случайно расположенными точками (км); для месторождений всех металлов значения R значительно отличаются от $R_{сл}$ по критерию Стьюдента при 95 % уровне значимости.

что все геологические процессы связаны с процессами формирования рудных объектов через соответствующие поля концентраций (геохимические поля).

Принятие концентраций химических элементов в качестве информационной основы прогнозирования рудных объектов не исключает использование данных о составе и структуре породных комплексов, геофизических полях и аномалиях, тектонических нарушениях, так как в каких-то ситуациях и масштабах эти характеристики могут становиться главными.

В недалёком будущем практический интерес для оценки недр будут, вероятно, представлять некоторые методы получения информации о физико-химических параметрах геологической среды [20].

Развитие информационного обеспечения оценки недр на рудные полезные ископаемые заключается не только и, возможно, не столько в расширении круга характеристик геологической среды. Важными представляются построение и использование иерархической системы цифровых **моделей геологического пространства (GSM)**. Эти модели должны строиться в координатах XY (стартовый вариант), XYZ, XYT, XYZT, где X, Y, Z – геометрические координаты пространства, T – координата времени. При этом под геологическим пространством будем понимать часть физического пространства, занятого планетой Земля или любую его часть [1].

GSM включают и объединяют математические поля следующих групп характеристик геологической среды:

- физические характеристики (или характеристики 1-го рода);
- виртуальные (производные) характеристики (или характеристики 2-го рода).

Физические характеристики могут быть непосредственно измерены или оценены (содержания элементов, типы горных пород, гравитационные и электромагнитные поля). Некоторого пояснения требуют виртуальные характеристики. Они не мо-

гут быть измерены непосредственно и строятся на основе связи с какими-то физическими характеристиками, некими знаниями или субъективными представлениями и целями их конструирования. Эти характеристики реально не существуют, но могут быть успешно использованы при решении некоторых конкретных задач. Например, виртуальными характеристиками являются соотношения содержаний элементов, геохимические ассоциации, породные формации, плотность тектонических нарушений, результаты любого районирования, выделяемые аномалии, поля плотности оруденения и др.

Общие требования к физическим и виртуальным характеристикам GSM:

1. Характеристики (или их совокупности) должны иметь содержательный смысл, то есть их включение в модель можно объяснить на основе представлений о закономерностях размещения и локализации прогнозируемых типов оруденения.
2. Характеристики должны быть объективно определяемыми (воспроизводимыми) и по возможности оцениваться в порядковой или числовой шкалах.
3. Желательно, чтобы характеристики не дублировали одну и ту же информацию.
4. Определение характеристик должно увязываться с практически выполнимыми операциями.
5. Характеристики должны быть определены по всей или большей части геологического пространства, для которого строится модель.

Все характеристики с помощью процедур аппроксимации, экстраполяции, решения обратных задач и, возможно, томографии преобразуются в математические поля в соответствующих координатах (под математическим полем будем понимать задание в каждой точке геометрического или геометрическо-временного пространства физических и виртуальных характеристик). В GSM будут определяться модельные значения характеристик геологической среды в узлах задаваемой регулярной сетки

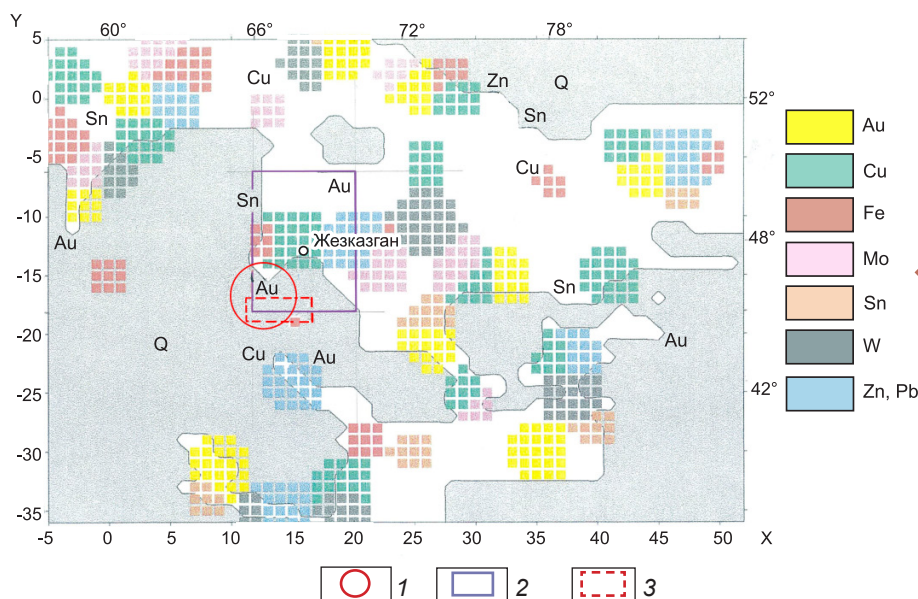


Рис. 4. Схема размещения на территории Казахстана и Средней Азии эпицентров плотности оруденения (рудных районов) Au, Cu, Fe, Mo, Sn, W, Zn и Pb:

1 – «вакансия» золоторудного района; 2 – территория проведения геохимического картирования Жезказганского рудного региона (2014–2015); 3 – Южно-Карсакапская площадь (14 000 км²), перспективная на золотое оруденение; Q – рыхлые отложения и отсутствие данных (ЮВ угол); химические символы – «вакансии» размещения рудных объектов соответствующих металлов; X, Y – условные координаты

2–4D. В этих же узлах для каждой характеристики будет определяться специальный показатель «веса» её модельного значения. Он требуется в связи с тем, что процедуры построения математических полей обеспечивают только вероятностное определение модельных значений характеристик и в каждом узле необходима «надёжность» этих оценок.

GSM будут включать в себя модели целевых характеристик прогнозирования в виде полей плотности оруденения разных металлов, построенных по оценкам запасов известных рудных объектов и модели прогностических («косвенных») характеристик геологической среды, описывающих геохимические поля и структуры, развитие вулканогенно-осадочных и магматических пород, плотность разрывных нарушений, геофизические поля и структуры и др. Использование корреляционного, факторного, кластерного анализов и других методов позволит на информационной основе GSM оптимизировать параметры моделей целевых и прогнозирующих характеристик, строить модели-эталонные 3–4 поколений различных типов рудных объектов [18], выделять потенциально перспективные площади и давать по ним оценки прогнозных ресурсов.

7. Постоянное развитие соответствующих методов и технологий требуется для преобразования знаний (гипотез, моделей, предположений) и информации о характеристиках геологической среды, геологических объектов в оценки недр (в частности, в прогноз рудных полезных ископаемых) [17]. Необходимо признать, что большинство получаемых в настоящее время прогнозных оценок недр опира-

ется на субъективные экспертные суждения (что не всегда плохо) и на простые линейные аналогии (далеко не всегда адекватные реалиям). По мнению авторов, необходимо срочно, пока эта ниша не потеряна (как произошло с системами подсчёта запасов), приступить к разработке **технологической системы цифрового прогнозирования**, ориентированной на выявление скрытых рудных объектов.

В настоящее время обработка информации в рамках прогнозно-поисковых исследований проводится с помощью нескольких главных операций, основой которых является аппарат математической статистики. Её преимуществом (при ряде ограничений) является возможность решать нечётко поставленные задачи, использовать информацию со случайными отклонениями и неполной воспроизводимостью. Например, в программном комплексе Elan [16, 18], ориентированном на прогнозирование рудных полезных ископаемых на основе обработки больших массивов многомерной числовой информации и специального моделирования, реализуются следующие главные операции:

- структурный статистический анализ распределения данных;
- построение гибко регулируемых аппроксимационных моделей 1–3D (в основном 2D) распределения характеристик по области прогнозирования V ;
- анализ силы и формы нелинейной корреляции с помощью вычисления оптимального корреляционного отношения;
- классификации и районирование слаборазличающихся многомерных данных без априорной информации о числе;

3. Средние кратчайшие расстояния между эпицентрами плотности оруденения (рудными районами)

Эпицентры металлов	Число эпицентров	R	R _{сл}	R/R _{сл}
Au (все)	9	400	250	1,6
Au (крупные)	4	900	400	2,4
Cu (все)	11	330	220	1,5
Cu (крупные)	5	540	350	1,55
Zn (крупные)	6	570	320	1,8
Fe (все)	10	440	230	1,4
Mo (крупные)	8	330	270	1,2
W (все)	7	500	290	1,9

Примечание. R – средние кратчайшие расстояния между объектами (км); R_{сл} – средние кратчайшие расстояния между случайно расположенными точками (км); для эпицентров плотности оруденения всех металлов значения R заметно отличаются от R_{сл} по критерию Стьюдента при 95 % уровне значимости.

- построение многомерных нелинейных прогнозных функций (при наличии эталонов прогнозирования).

Остановимся на некоторых новых операциях, разработка которых крайне желательна и даже необходима для современных технологий цифрового прогнозирования.

Перспективным направлением в прогнозировании рудных полезных ископаемых является методика анализа **взаимосвязи характеристик геологической среды с учётом их пространственной природы** на основе следующего функционала:

$$COR = \{ [S(Y_b) \cap S(X_b)] / [S(Y_b) \cup S(X_b)] \} \times [i(Y_b) + i(X_b)],$$

где S(Y_b), S(X_b) – длины, площади или объёмы, в которых характеристики Y и X больше Y_b и X_b;

i(Y_b), i(X_b) – шенноновская информативность $i = -\ln P$, P – вероятность Y и X быть больше Y_b и X_b.

Использование методов выявления и описания пространственных переменных потенциально может обеспечить кодирование значительно большего объёма целевой информации при прогнозировании рудных полезных ископаемых.

При прогнозе полезных ископаемых необходимо учитывать **диффузность или «плохую организацию» рудообразующей среды, систем и объектов**. В таких средах, системах и объектах сложно, а иногда невозможно разграничить влияние разнородных факторов, выделить уровни иерархической организации и даже определить их внешние границы. Для технологии цифрового прогнозирования рудных объектов потребуется разработать методы описания и выделения диффузных систем. Оцифрование таких систем должно послужить входным материалом для генерации алгоритмов распознавания геологических объектов посредством искусственного интеллекта, который, в свою очередь, должен позволять оценивать множество исследуемых объектов на предмет их рудоносности.

Проблемы **томографии** геологических сред на базе поверхностных опробований, интерпретируемых как скалярные поля, не получили решения на данный момент времени. Между тем это очень важная задача, поскольку её решение могло бы существенно расширить интерпретационные возможности геохимического или иного состояния геологических сред в оцениваемых районах поиска рудных объектов за счёт получения дополнительной информации об объёме среды. В общем случае, оставаясь в рамках анализа только эмпирического материала, полученного в результате геохимического или иного опробования дневной поверхности, в принципе невозможно создание томографических алгоритмов оценки земных недр. Решение этой задачи становится возможным только при включении в рассмотрение физических и химических процессов масса- и теплопереноса, приводящих к тем или иным последствиям в распределении вещества в геологических средах.

Большой объём получаемой для прогнозирования рудных полезных ископаемых информации, который увеличится на порядок и более с введением в эту операцию моделей геохимических полей, методов описания диффузных систем, томографии, требует приступить к разработке и использованию **технологий искусственного интеллекта**. Алгоритмическая основа специализированного искусственного интеллекта в области геологии (геохимии) может быть основана на теориях распознавания образов и нейросетей. При этом понятие образ в данном случае понимается в широком смысле слова.

Необходимость использования технологии искусственного интеллекта при цифровом прогнозировании рудных объектов связана с тем, что в большой диффузной системе геологической среды может содержаться огромное число «рудных» подсистем разных иерархических уровней, полное выделение

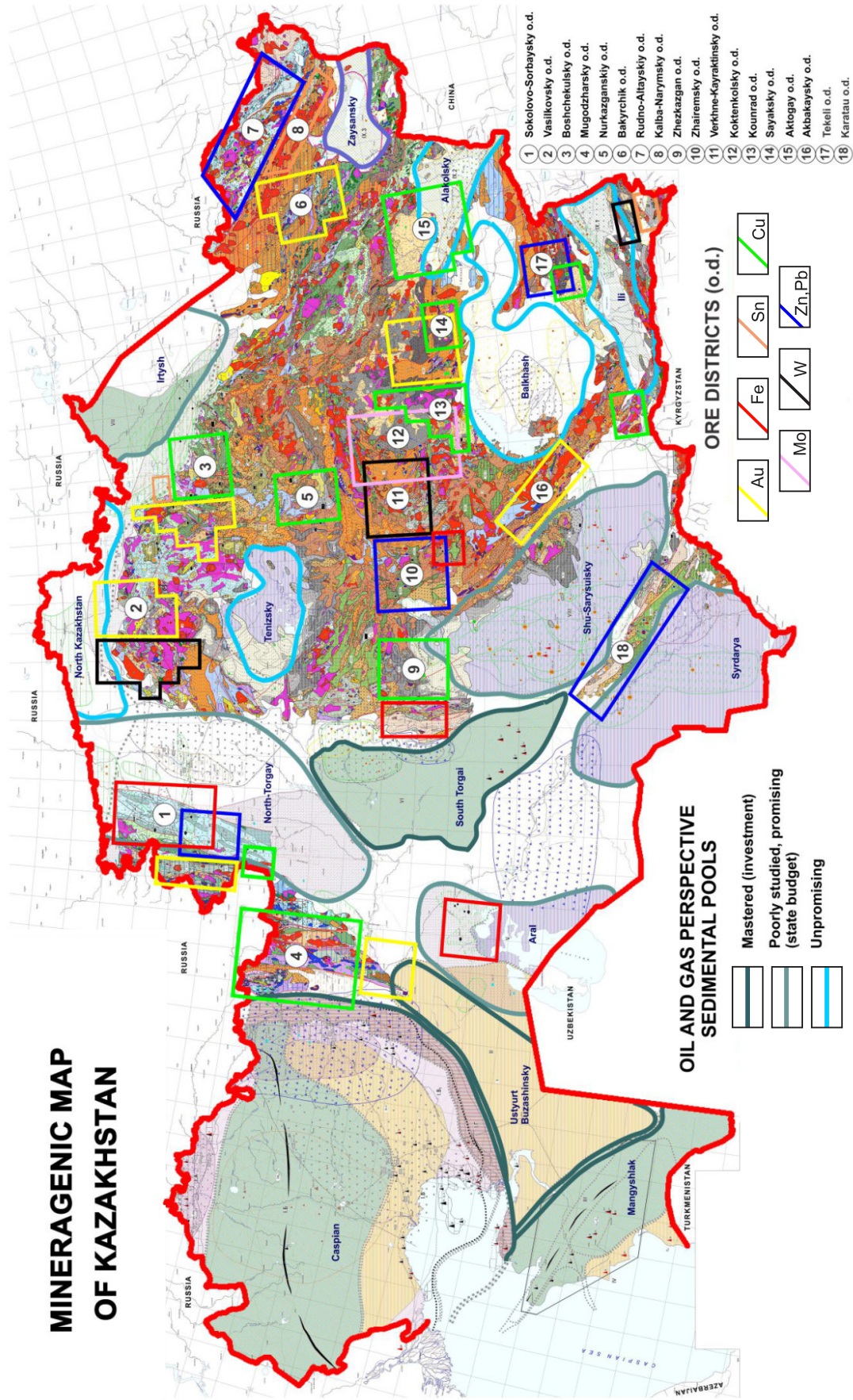


Рис. 5. Совмещение эпицентров плотности оруденения (рудных районов) Au, Cu, Fe, Mo, Sn, W, Zn и Pb с минератенической картой Казахстана. Подготовлена к 36 Международному геологическому конгрессу

которых традиционными методами затруднительно. Искусственный интеллект будет помогать специалистам при принятии решений о перспективности «рудных» подсистем благодаря синтезу, анализу и визуализации информации.

Системное и непрерывное развитие научно-методологического и технологического обеспечения геологоразведочных работ на основе принципов междисциплинарности, математизации и цифровизации, продвижение в намеченных и других направлениях с высокой вероятностью приведут к резкому повышению эффективности прогнозно-поисковых работ, ориентированных на выявление скрытых рудных объектов.

Авторы благодарят Г. Г. Фреймана за ценные советы при редактировании данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин Ю. А., Алабин Б. К., Гольдин С. В. и др. Геология и математика. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1967. – 254 с.
2. Гольдберг И. С. Рудообразование в геоэлектрхимических системах // Геология и охрана недр. – 2005. – № 2(15). – С. 28–40.
3. Гольдберг И. С., Абрамсон Г. Я., Лось В. Л. Геохимические системы рудных объектов: примеры, модель, генетические и поисковые критерии // Геология и охрана недр. – 2003. – № 1(7). – С. 24–33.
4. Даукеев С. Ж., Ужкенов Б. С., Абдулин А. А. и др. Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана. Т. 2. Металлогения. – Алматы, 2002. – 272 с.
5. Иванюк Г. Ю., Горяинов П. М., Егоров Д. Г. Введение в нелинейную геологию. – Апатиты, 1996. – 188 с.
6. Концепция развития геологической отрасли Республики Казахстан до 2030 года. – Астана, 2012.
7. Кривоцв А. И. Прикладная металлогения. – М.: Изд-во Недр, 1989. – 288 с.
8. Летников Ф. А. Процессы самоорганизации при формировании магматических и гидротермальных рудных месторождений // Геология рудных месторождений. – 1997. – Т. 38, № 4. – С. 307–322.
9. Летников Ф. А. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. – 229 с.
10. Летников Ф. А. Флюидный режим эндогенных процессов в континентальной литосфере и проблемы металлогении // Материалы теоретического семинара ОГГИ РАН, 1998–1999 гг. – М.: ГЕОС, 2000. – С. 204–224.
11. Лось В. Л. Металлогенические системы и механизмы рудообразования // Геология и охрана недр. – 2005. № 4(17). – С. 28–36.
12. Лось В. Л. Самоорганизация в геологических системах // Геология и охрана недр. – Алматы, 2005. – № 1(4). – С. 75–80.
13. Лось В. Л. Теоретические, методические и технологические основы прогноза рудных объектов // Геонауки в Казахстане. – Алматы, 2004. – С. 228–239.
14. Лось В. Л., Гоберник И. А. Самоорганизация геологических систем. Проблемы моделирования // Динамический хаос в распределенных системах. – Алматы, 1997. – С. 8–18.
15. Лось В. Л., Лаумулин Ч. Т., Цеховой А. Ф. Модернизация оценки недр: от управления по заданиям к управлению по результатам // Горный журнал Казахстана. – 2017. – № 3. – С. 14–19.
16. Лось В. Л., Легонькин В. С. Математизация и компьютеризация оценки недр. Программный комплекс ELAN // Геология и охрана недр. – 2008. – № 3(28). – С. 61–66.
17. Лось В. Л., Мурзадилов Т. Д. Концепция и методология нового технологического «мейнстрима» прогнозно-поисковых работ на рудные полезные ископаемые // Геология и охрана недр. – 2018. № 3(68). – С. 58–67.
18. Лось В. Л., Усманов Ф. А., Гольдберг И. С. и др. Прогноз, поиски и моделирование рудных объектов // Комплексная переработка минерального сырья. Состояние, проблемы, решения. – Алматы, 2008. – Т. 1а. – 466 с.
19. Нарсеев В. А. Структурирование геологического пространства (в поисках новой парадигмы геологии) // Геология и охрана недр. – Алматы, 2007. – № 1(22). – С. 15–18.
20. Нарсеев В. А., Петровский А. Д. Нормализованные масс-энергетические показатели комплексов среды рудоотложения. Препринт. – М.: Изд-во РАЕН, 1993. – 45 с.
21. Смирнов В. И. Геология полезных ископаемых. – М.: Изд-во Недр, 1982. – 669 с.
22. Старостин В. И. Металлогения. – М., 2012. – 560 с.
23. Старостин В. И., Сорохтин О. Г. Новая концепция генезиса сульфидных медно-никелево-платиновых месторождений // Геология и охрана недр. – 2010. – № 4(37). – С. 9–16.
24. Ужкенов Б. С., Сайдукасов М. А., Мазуров А. К., Селифонов Е. М. Минерально-сырьевая база меди, свинца, цинка, золота Республики Казахстан. Состояние, прогноз развития // Сырьевая база свинца и цинка, меди и золота Казахстана. – Алматы, 2002. – С. 4–5.
25. Усманов Ф. А. Главнейшие принципы современной металлогении // Современные проблемы металлогении. – Ташкент: ФАН, 2002. – С. 12–16.
26. Фрейман Г. Г. Ключевые элементы реформирования горно-геологической отрасли Казахстана, переход на международные стандарты публичной геологической отчетности // Роль университетов в создании инновационной экономики. – Усть-Каменогорск, 2018. – С. 307–313.
27. Щеглов А. Д. Основы металлогенического анализа. – М.: Недр, 1980. – 432 с.
28. Goldberg I. S., Abramson G. J., Haslam C. O., Los V. L. Geoelectrochemical Exploration: Principles, Practice and Performance. Recourcing the 21st Century. Australia, Ballarat, 1997. – P. 193–199.
29. Goldberg I. S., Abramson G. Y., Los V. L. Depletion and enrichment of primary haloes: their importance for mineral

- deposits. Y. *Geochimical Exploration. Environment, Analyses.* – 2003. – V. 3. – P. 281–293.
30. *Groves D. I., Goldfarb R. J., Gerbe-Mariam M.* et al. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal contribution and relationship to other gold deposit types: *Ore Geology Reviews.* – 1998. – V. 13. – P. 7–21.
31. *Sillitoe R. N.* Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region // *Australian Journal of earth Sciences.* – 1997. – V. 44. – P. 373–388.

REFERENCES

1. *Voronin Yu. A., Alabin B. K., Gol'din S. V.* et al. *Geologiya i matematika [Geology and mathematics]*, Novosibirsk, Nauka publ, 1967, 254 p. (In Russ.).
2. *Gol'dberg I. S.* Rudoobrazovaniye v geoelektrokhimicheskikh sistemakh [Ore formation in geoelectrochemical systems], *Geologiya i okhrany nedr*, 2005, No. 2(15), P. 28–40. (In Russ.).
3. *Gol'dberg I. S., Abramson G. Ya., Los V. L.* Geokhimicheskiye sistemy rudnykh ob'yektov: primery, model', geneticheskiye i poiskovyie kriterii [Geochemical systems of ore objects: examples, model, genetic and search criteria], *Geologiya i okhrana nedr*, 2003, No. 1(7), P. 24–33. (In Russ.).
4. *Daukeyev S. Zh., Uzhkenov B. S., Abdulin A. A.* et al. Glubinnoye stroyeniye i mineral'nyye resursy Kazakhstana [Deep structure and mineral resources of Kazakhstan], V. 2, *Metallogeniya*, Almaty, 2002, 272 p. (In Russ.).
5. *Ivanyuk T. Yu., Goryainov P. M., Yegorov D. G.* Vvedeniye v nelineynuyu geologiyu [Introduction to Nonlinear Geology], *Apatity*, 1996, 188 p. (In Russ.).
6. *Kontseptsiya razvitiya geologicheskoy otrasli Respubliki Kazakhstan do 2030 goda [Concept for the development of the geological industry of the Republic of Kazakhstan until 2030]*, Astana, 2012. (In Russ.).
7. *Krivtsov A. I.* *Prikladnaya metallogeniya [Publishing house of Nedra]*, Moscow, Nedra publ., 1989, 288 p. (In Russ.).
8. *Letnikov F. A.* Protsessy samoorganizatsii pri formirovaniy magmaticheskikh i gidrotermal'nykh rudnykh mestorozhdeniy [Self-organization processes during the formation of magmatic and hydrothermal ore deposits], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1997, V. 38, No. 4, P. 307–322. (In Russ.).
9. *Letnikov F. A.* Sinergetika geologicheskikh system [Synergetics of geological systems], Novosibirsk, Nauka publ., 1992, 229 p. (In Russ.).
10. *Letnikov F. A.* Flyuidnyy rezhim endogennykh protsessov v kontinental'noy litosfere i problemy metallogenii [Fluid regime of endogenous processes in the continental lithosphere and problems of metallogeny], *Materialy teoreticheskogo seminaru OGGGI RAN*, 1998–1999, Moscow, GEOS publ., 2000, P. 204–224. (In Russ.).
11. *Los V. L.* Metallogenicheskiye sistemy i mekhanizmy rudoobrazovaniya [Metallogenic systems and mechanisms of ore formation], *Geologiya i okhrana nedr*, 2005, No. 4(17), P. 28–36. (In Russ.).
12. *Los V. L.* Samoorganizatsiya v geologicheskikh sistemakh [Self-organization in geological systems], *Geologiya i okhrana nedr*, Almaty, 2005, No. 1(4), P. 75–80. (In Russ.).
13. *Los V. L.* Teoreticheskiye, metodicheskiye i tekhnologicheskkiye osnovy prognoza rudnykh ob'yektov [Theoretical, methodological and technological foundations for forecasting ore objects], *Geonauki v Kazakhstane*, Almaty, 2004, P. 228–239. (In Russ.).
14. *Los V. L., Governik I. A.* Samoorganizatsiya geologicheskikh sistem. Problemy modelirovaniya [Self-organization of geological systems. Modeling problems], *Dinamicheskii khaos v raspredelennykh sistemakh*, Almaty, 1997, P. 8–18. (In Russ.).
15. *Los V. L., Laumulin Ch. T., Tsekhovoy A. F.* Modernizatsiya otsenki nedr: ot upravleniya po zadaniyam k upravleniyu po rezul'tatam [Modernization of subsoil assessment: from management by assignments to management by results], *Gornyy zhurnal Kazakhstana*, 2017, No. 3, P. 14–19. (In Russ.).
16. *Los V. L., Legon'kin V. S.* Matematizatsiya i komp'yuterizatsiya otsenki nedr. Programmnyy kompleks ELAN [Mathematization and computerization of subsurface assessment. ELAN software package], *Geologiya i okhrana nedr*, 2008, No. 3(28), P. 61–66. (In Russ.).
17. *Los V. L., Murzadilov T. D.* Kontseptsiya i metodologiya novogo tekhnologicheskogo «meynstrima» prognozno-poiskovykh rabot na rudnyye poleznyye iskopayemyye [Concept and methodology of a new technological “mainstream” of forecasting and prospecting works for ore minerals], *Geologiya i okhrana nedr*, 2018, No. 3(68), P. 58–67. (In Russ.).
18. *Los V. L., Usmanov F. A., Gol'dberg I. S.* et al. Prognoz, poiski i modelirovaniye rudnykh ob'yektov [Forecast, prospecting and modeling of ore objects], *Kompleksnaya pererabotka mineral'nogo syr'ya. Sostoyaniye, problemy, resheniya*. Almaty, 2008, V. 1a, 466 p. (In Russ.).
19. *Narseyev V. A.* Strukturirovaniye geologicheskogo prostranstva (v poiskakh novoy paradigmy geologii) [Structuring geological space (in search of a new paradigm of geology)], *Geologiya i okhrana nedr*, Almaty, 2007, No. 1(22), P. 15–18. (In Russ.).
20. *Narseyev V. A., Petrovskiy A. D.* Normalizovannyye massenergeticheskiye pokazateli kompleksov sredey rudoobrazovaniya. Preprint [Normalized mass-energy indicators of ore deposition environment complexes. Preprint], Moscow, RAYEN publ., 1993, 45 p. (In Russ.).
21. *Smirnov V. I.* *Geologiya poleznykh iskopayemykh [Geology of minerals]*, Moscow, Nedra publ., 1982, 669 p. (In Russ.).
22. *Starostin V. I.* *Metallogeniya [Metallogeny]*, Moscow, 2012, 560 p. (In Russ.).
23. *Starostin V. I., Sorokhtin O. G.* Novaya kontseptsiya genezisa sul'fidnykh medno-nikelevo-platinovykh mestorozhdeniy [A new concept of the genesis of sulfide copper-nickel-platinum deposits], *Geologiya i okhrany nedr*, 2010, No. 4(37), P. 9–16. (In Russ.).

24. *Uzhkenov B. S., Sayduakasov M. A., Mazurov A. K., Selifonov Ye. M.* Mineral'no-syr'yevaya baza medi, svintsa, tsinka, zolota Respubliki Kazakhstan. Sostoyaniye, prognoz razvitiya [Mineral resource base of copper, lead, zinc, gold of the Republic of Kazakhstan. State, development forecast], Syr'yevaya baza svintsa i tsinka, medi i zolota Kazakhstana, Almaty, 2002, P. 4–5. (In Russ.).
25. *Usmanov F. A.* Glavneyshiye printsipy sovremennoy metallogenii [Glavneyshiye printsipy sovremennoy metallogenii], Sovremennyye problemy metallogenii. Tashkent, FAN publ., 2002, P. 12–16. (In Russ.).
26. *Freyman G. G.* Klyuchevyye elementy reformirovaniya gorno-geologicheskoy otrasli Kazakhstan, perekhod na mezhdunarodnyye standarty publichnoy geologicheskoy otchetnosti [Key elements of reforming the mining and geological industry in Kazakhstan, the transition to international standards for public geological reporting], Rol' universitetov v sozdanii innovatsionnoy ekonomiki. Ust'-Kamenogorsk, 2018, P. 307–313. (In Russ.).
27. *Shcheglov A. D.* Osnovy metallogenicheskogo analiza [Fundamentals of metallogenic analysis], Moscow, Nedra publ., 1980, 432 p. (In Russ.).
28. *Goldberg I. S., Abramson G. J., Haslam C. O., Los V. L.* Geoelectrochemical Exploration: Principles, Practice and Performance. Recourcing the 21st Century, Australia, Ballarat, 1997, P. 193–199.
29. *Goldberg I. S., Abramson G. Y., Los V. L.* Depletion and enrichment of primaru haloos: their importance for mineral deposits. Y. Geochemical Exploration. Environment, Analysies, 2003, V. 3, P. 281–293.
30. *Groves D. I., Goldfarb R. J., Gerbe-Mariam M.* et al. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal contribution and relationship to other gold deposit types, Ore Geology Reviews, 1998, V. 13, P. 7–21.
31. *Sillitoe R. N.* Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region, Australian Journal of earth Sciences, 1997, V. 44, P. 373–388.



РОСНЕДРА

2 апреля 2021г.

Всероссийский форум

2021 НЕДРА

Изучение. Разведка. Добыча.