DOI: 10.24411/0869-7175-2019-10048

УДК 553.04(574)
© В.Л.Лось, И.С.Гольдберг, 2019

Базовая модель, методика, результаты и программа прогнозно-поисковых работ на основе технологии Ionex в Казахстане

В.Л.ЛОСЬ (Общественное объединение Академия минеральных ресурсов Республики Казахстан (АО АМР РК); 050000, Казахстан, г. Алматы, пр. Абылай хана, 91, оф. 1004),
И.С.ГОЛЬДБЕРГ (Geochtm.Pty.Ltd; Австралия)
Характеризуется состояние прогнозных исследований на рудные полезные ископаемые. Рассматриваются теоретико-методологические основы прогнозирования, предлагается модель рудообразования на основе представлений о перераспределении элементов «in situ» в рамках рудообразующих геохимических систем. Приводится стандартный образ рудообразующих геохимических систем и информационная основа для их выделения. Для проведения прогнозно-поисковых работ в качестве базового метода рекомендуется геохимическая технология Ionex. Показаны примеры использования технологии в Казахстане. Предлагается концепция и схема нового направления прогнозно-поисковых работ на основе технологии Ionex и методов цифрового прогнозирования.
Ключевые слова: рудные полезные ископаемые, прогнозирование, геохимические системы, геохимические ассоциации, технология Ionex, концепция прогнозно-поисковых работ, цифровое прогнозирование.

Лось Владимир Львович
доктор геолого-минералогических наук
v_los@mail.ru

Гольдберг Иссай Соломонович
кандидат геолого-минералогических наук
geo@issaigoldberg.com

Basic model, methodology, results and program for forecasting-prospecting on the basis of Ionex technology in Kazakhstan

V.L.LOS (Academy of Mineral Resources of Republic of Kazakhstan (AMR RK)),
I.S.GOLDBERG (Geochtm.Pty.Ltd)
The status of ore deposits forecasting is characterized. The theoretical and methodological basics of forecasting are considered, an ore formation model is proposed based on the ideas about *in situ* redistribution of elements within ore-forming geochemical systems. A standard image of ore-forming geochemical systems and an information basis for their isolation are given. For forecasting and prospecting, the Ionex geochemical technology is recommended as the basic method. Examples of the technology use in Kazakhstan are shown. The concept and scheme of a new direction of forecasting and prospecting based on Ionex technology and digital forecasting methods are proposed.
Key words: ore deposits, forecasting, geochemical systems, geochemical associations, Ionex technology, concept of forecasting and prospecting, digital forecasting.

Состояние и направления прогнозных исследований рудных полезных ископаемых. В последние десятилетия произошли глубокие изменения геологоразведочной ситуации в сфере выявления новых рудных объектов, обусловленные исчерпанием фонда выходящих на поверхность или близповерхностных месторождений. Выяснилось, что используемые традиционные прогнозно-поисковые 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 [9, 32].

В настоящее время необходимо ориентироваться, используя соответствующие знания, информацию и технологии, на выявление рудных объектов с низким статусом открываемости: глубокозалегающие, перекрытые аллохтонными отложениями (рыхлыми породами, базальтами и др.), не имеющие явных индикативных признаков на поверхности.

В целом низкая эффективность прогноза, прежде всего, связана с трудностью самой задачи прогнозирования рудных объектов. Это задача моделирования поведения сложных диффузных нелинейных систем с самоорганизацией при недостаточной информации об этих системах и невозможностью наблюдать динамику их развития. Теоретико-методологические, информационные и методико-технологические аспекты задачи оценки недр на рудные полезные ископаемые тесно переплетаются между собой и возможно лишь совместное продвижение на пути их решения. Развитие теории рудообразования невозможно без математического и компьютерного моделирования механизмов рудообразующих процессов, включая мобилизацию, перемещение и отложение рудного вещества. Дело в том, что, приближаясь к фундаментальным основам любой науки, уже не обойтись без математики, физики, химии и нельзя опираться лишь на обыденные представления и «здравый смысл». Необходимо использовать объективную числовую информацию о недрах (первичных и вторичных характеристиках геологической среды и геологических систем), позволяющую в принципе решать задачу прогноза тех или иных типов полезных ископаемых с определённой надёжностью и применять цифровые технологии, преобразующие знания и информацию в прогнозную оценку недр.

Можно сформулировать ряд требований, которым должны отвечать новые технологические подходы, ориентированные на прогноз и поиски рудных объектов с низким статусом открываемости. В частности, они должны:

- обладать достаточным запасом научной, информационной и технологической новизны;
- учитывать новые металлогенические модели и представления (похоже, что «геосинклинали», «геотектоника» и даже «плюмы» в значительной мере выработали свой ресурс);
- использовать в качестве базовой информации объективно измеряемые, по возможности, определяемые в сильных шкалах характеристики геологической среды и геологических систем;
- основываться на отечественных, имеющих экспортный потенциал методах и технологиях извлечения из знаний и информации данных о размещении перспективных на рудные месторождения участков;
- оценивать стоимость и экономическую конкурентоспособность работ.

К сожалению, пока приходится констатировать, что научные исследования, призванные обеспечить теоретико-методологические основы оценки недр на рудные полезные ископаемые, стратегически не ориентированы на прогноз, разрознены и недостаточно системны. В них практически отсутствует междисциплинарность, совершенно недостаточно используются результаты фундаментальных наук и очень ограничено – возможности математического и компьютерного моделирования рудообразующих процессов, систем и объектов. Информационную основу прогнозно-поисковых работ продолжают составлять традиционные характеристики (породный состав, разломы, метасоматоз, геофизические и позитивные геохимические аномалии и др.) и которые, в принципе не могут существенно повысить эффективность прогнозно-поисковых работ. Практически не используются процедуры определения целевой (прогностической) ценности отбираемых для прогноза характеристик геологической среды. Хотя известно и доказано, что включение в систему прогноза неинформативных характеристик снижает надёжность вычисляемой целевой характеристики прогнозирования [24].

Что касается собственно прогноза, то он продолжает основываться на субъективных экспертных оценках (что не всегда плохо!), а разработки прогнозно-поисковых технологий (их методологии, алгоритмов и программ) почти полностью прекратились. Конечно, интуиция, знания, опыт специалиста очень полезны, но владение новыми современными технологиями прогнозирования и их использование не менее важны. Требование учёта стоимости обозначает, что новый технологический подход к прогнозно-поисковым работам не должен опираться на аксиому тотальной «комплексности», так как она значительно увеличивает общую цену работ, обычно не приводящую к существенному повышению эффективности исследований и новым результатам.

Одними из наиболее перспективных направлений в сфере прогнозирования рудных месторождений с низким статусом открываемости будут:

- использование представлений о перераспределении элементов в геологической среде;
- информация о структурах геохимических полей рудных, сопутствующих и других элементов и, главное, о геохимических полях подвижных форм этих элементов (строится на основе фазовых анализов вещества), позволяющих выявлять скрытые рудные объекты;
- широкое применение методов и технологий цифрового прогнозирования полезных ископаемых.

В значительной мере эти направления соединены и реализованы в прогнозно-поисковой геохимической ***технологии Ionex*** [4, 29, 34]**.**

Теоретико-методологические основы прогнозирования рудных полезных ископаемых. Важнейшим аспектом эффективности, точности и надёжности прогнозно-поисковых исследований является их теоретико-методологическое обеспечение, определяемое уровнем развития металлогении. Тренд такого развития основывается на трансформации качественных металлогенических сценариев, одномерных линейных схем, одноуровневых аналогий к расшифровке, формализованным цифровым описаниям и моделям механизмов рудообразования, адекватным физической сущности

процессов рудообразования и основанным на объективной информации (наблюдаемых фактах) [18].

Примем как базисную аксиому, что ***фундаментальной физической основой формирования рудных объектов в геологической среде являются перемещение, ассоциация, дифференциация химических элементов*** (в частности, металлов, имеющих низкие кларки концентрации). В качестве другой базисной аксиомы можно принять следующее положение: ***рудные объекты (месторождения, рудные поля, узлы, районы) являются не случайными, а специфическими геологическими образованиями, которые органично присущи земной коре и протекающим в ней процессам перераспределения вещества.*** Несмотря на кажущуюся тривиальность, данные аксиомы ставят под сомнение металлогенические построения, основанные на случайном совмещении факторов или «впрыскивании» металлов с больших глубин (хотя последнее не исключается).

Собственно *методология* исследований должна 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) [8, 12, 15, 26].

Явление самоорганизации в 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 мы можем 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.

Результаты самоорганизации фиксируются появлением пространственной и(или) временной упорядоченности (например, ритмов, ячеек), структурным и(или) вещественным усложнением объектов (что, в общем, соответствует антиэнтропийной направленности развития) и, главное, в образовании однотипных по веществу и структуре объектов в разных средах и условиях.

Таким образом, наиболее адекватная методология при металлогенических исследованиях, а особенно

1. Типы поведения систем

Воздействие (на систему)	Результат (изменение системы)	
	Неспецифическое	Специфическое
Неспецифическое	Хаотичное	Самоорганизационное
Специфическое	Вероятностное	Детерминированное

при исследованиях, ориентированных на получение количественных результатов, это системно-синергетическая методология.

Базовая модель рудообразования. Базовой моделью рудообразования, в той или иной степени объединяющей разные металлогенические гипотезы и представления, может служить простая и ясная схема перераспределения элементов в геологической среде «in siti» [11, 16, 35]. 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 под термином «in siti» понимается тесная пространственная сближенность 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 негативными и положительными аномалиями рудообразующих и других элементов, которые в совокупности образуют ***рудообразующие (металлогенические) системы*** (рис. 1).

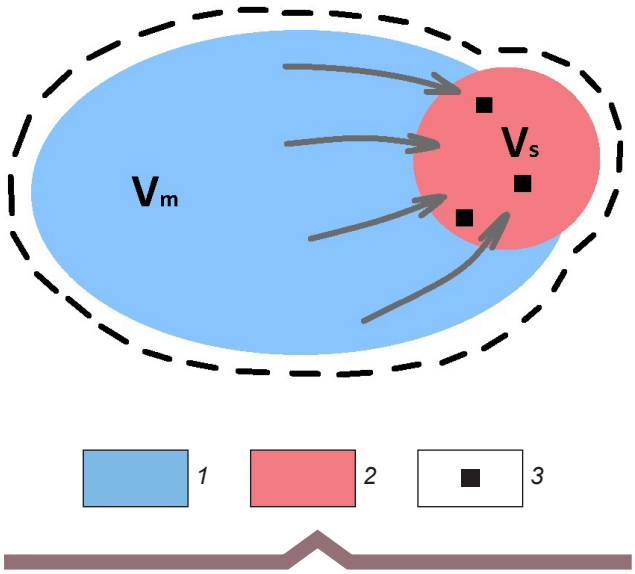


Рис. 1. Геохимический образ рудообразующей (металлогенической) системы:

1 – негативная аномалия, Vm (область выноса элементов); *2* – положительная аномалия, Vs (зона накопления рудных и сопутствующих элементов); *3* – рудные объекты

Если принять, что химические элементы в геологический период развития Земли не создавались и не уничтожались (распадом неустойчивых радиоактивных атомов можно пренебречь), то такое перераспределение соответствует структурированию полей концентраций элементов, которое в пределе может привести к образованию рудных месторождений, представляющих собой локальные концентрации тех или иных металлов в макрообъёмах. Отсюда следует очевидный и важный вывод: *все процессы, протекающие в геологической среде (осадконакопление, магматизм, метасоматоз и др.), и физические поля (температурные, электромагнитные, механических напряжений и др.) связаны с образованием месторождений не непосредственно, а через поля концентраций рудообразующих элементов*.

Задачи выделения рудообразующих систем достаточно сложны, не всегда однозначны, иногда практически не возможны, 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 (α_m=C_m/$C_к$; α_m <1; α_S=C_S/$C_к$; α_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 расположении 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 ($C > C_b$)≈0,05–0,2 M_S, то есть 5–20% мобилизованного и переотложенного элемента концетрируется собственно в месторождениях.

Возможности практического использования рассматриваемой модели 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 области мобилизации с какими-либо масштабными геологическими процессами (объектами). Например, с интрузивным и вулканогенным магматизмом, разного рода глубинными подвижными зонами. Кстати, потенциальные возможности этих процессов (объектов) для тонкой дифференциации вещества как необходимого условия рудообразования представляются не всегда очевидными.

Нельзя отрицать привнос элементов с больших глубин при формировании литосферы, который и определил её металлогеническую специализацию [13]. Однако следует указать на несколько общеизвестных фактов, которые свидетельствуют о том, что собственно формирование рудных объектов происходит за счёт металлов, извлекаемых из окружающих месторождения пород.

Во-первых, рудные месторождения обычно приурочены к формациям и зонам, обогащённым соответствующими металлами [1, 5, 28, 29]. В своей монографии С.Т.Бадалов делает вывод о том, что специализация рудообразующих систем, а соответственно и элементный состав месторождений зависят от потенциально обогащённых данными элементами вмещающих пород, и эта связь обусловлена генетически.

Во-вторых, глобально рудные объекты относительно равномерно распределены по поверхности континентов, которая не перекрыта чехлом рыхлых отложений или молодых вулканитов. Здесь под «равномерностью» понимается генерализованная плотность количества рудных объектов; по запасам металлов распределение существенно менее равномерное. Это свидетельствует о том, что образование рудных скоплений есть процесс, органично присущий всей континентальной земной коре, хотя, конечно, в каких-то ситуациях он стимулируется, а в каких-то угнетается. При этом источником металлов являлась сама земная кора, в противном случае никакой, даже относительной равномерности в распределении рудных объектов ожидать нельзя, и даже очень крупные регионы могли не содержать ни одного рудного объекта, что не соответствует реальности.

Наконец, наиболее наглядным фактом 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 ряде работ [5, 35 и др.].

Стандартный образ геохимических систем рудных объектов. Таким образом, ***рудообразующие (металлогенические) системы представляют собой пространственно сопряжённые области накопления и выноса металлов***, которые полно или фрагментарно фиксируются геохимическими полями в виде положительных и отрицательных «аномалий» [7]. Практическая применимость базовой модели образования рудных объектов в результате перераспределения элементов в земной коре «in siti» обосновывается тем, что рудные объекты, особенно крупные, располагаются в зонах накопления рудных и сопутствующих им элементов (или их ближайшей периферии), которые в пространстве тесно ассоциируют с областями пониженных концентраций этих элементов. Размеры рудообразующих систем варьируют от $n\times10^{4-6}$ км^2 (рудные провинции, районы) до $n\times10^{1-2}$ км^2 (месторождения), причём системы более низких уровней «вкладываются» в зоны накопления систем более высокого уровня. Такое «вложение» показано на примере рудной провинции Миссисипи (рис. 2).

Если рассматривать рудообразующие системы месторождений цветных, благородных и редких металлов, то можно выделить геохимические ассоциации 4 типов (подтипы 1 и 2 между собой разделяются нечётко), характерных для областей накопления металлов [30]:

A1 – Zn, Pb, Cu, Ag, Cd, Se, (Te, Bi, As);
A2 – Pb, Zn, (Ag, Cd);
B1 – Cu, (Ag, Pb, Sb, Re, As);
B2 – Cu, (Mo, Co, Au);
C1 – Au, Te, Bi, (As, Ag, Se, Sb);
C2 – Au, As, Sb;
D − Mo, W, Be, Re.

Ядра зон накопления часто характеризуются пониженными содержаниями сидерофилов и лантаноидов, которые выносятся на их периферию и часто формируют вокруг ядер своего рода «рубашку». Области выноса почти всегда характеризуются пониженными содержаниями элементов геохимических ассоциаций ***A***, ***B***, ***C*** и сидерофилов. По строению геохимических систем ассоциации ***D*** пока нет достаточной информации.

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*** [3, 6, 34, 36]. Представления об электрохимическом механизме мобилизации основываются на следующем:

- обычной несопоставимости в пространстве областей выноса и зон накопления элементов с какими-либо геологическими (породными) телами и(или) структурами;
- экспериментальных данных по электрохимическому извлечению элементов (в том числе рудообразующих металлов) из пород и минералов [3, 6];
- широком распространении электрических полей в земной коре, которые имеют различные природу, способы образования, размеры и потенциально способны переносить огромные массы вещества.

Приведённые данные явились основой для их приложения к природным геоэлектрохимическим процессам перераспределения элементов с образованием рудных месторождений.

Информационная основа прогнозирования рудных полезных ископаемых. Из базовой модели рудообразования вытекает достаточно очевидное следствие об *информационной основе прогнозирования рудных объектов*: наиболее естественными, фундаментальными и информационно важными характеристиками геологической среды при поисках рудных объектов являются концентрации химических элементов. Картирование полей концентрации − наиболее прямое и естественное направление прогнозирования и поисков рудных объектов.

Принятие концентраций химических элементов в качестве информационной основы прогнозирования рудных объектов не исключает использование данных о составе и структуре породных комплексов, геофизи-

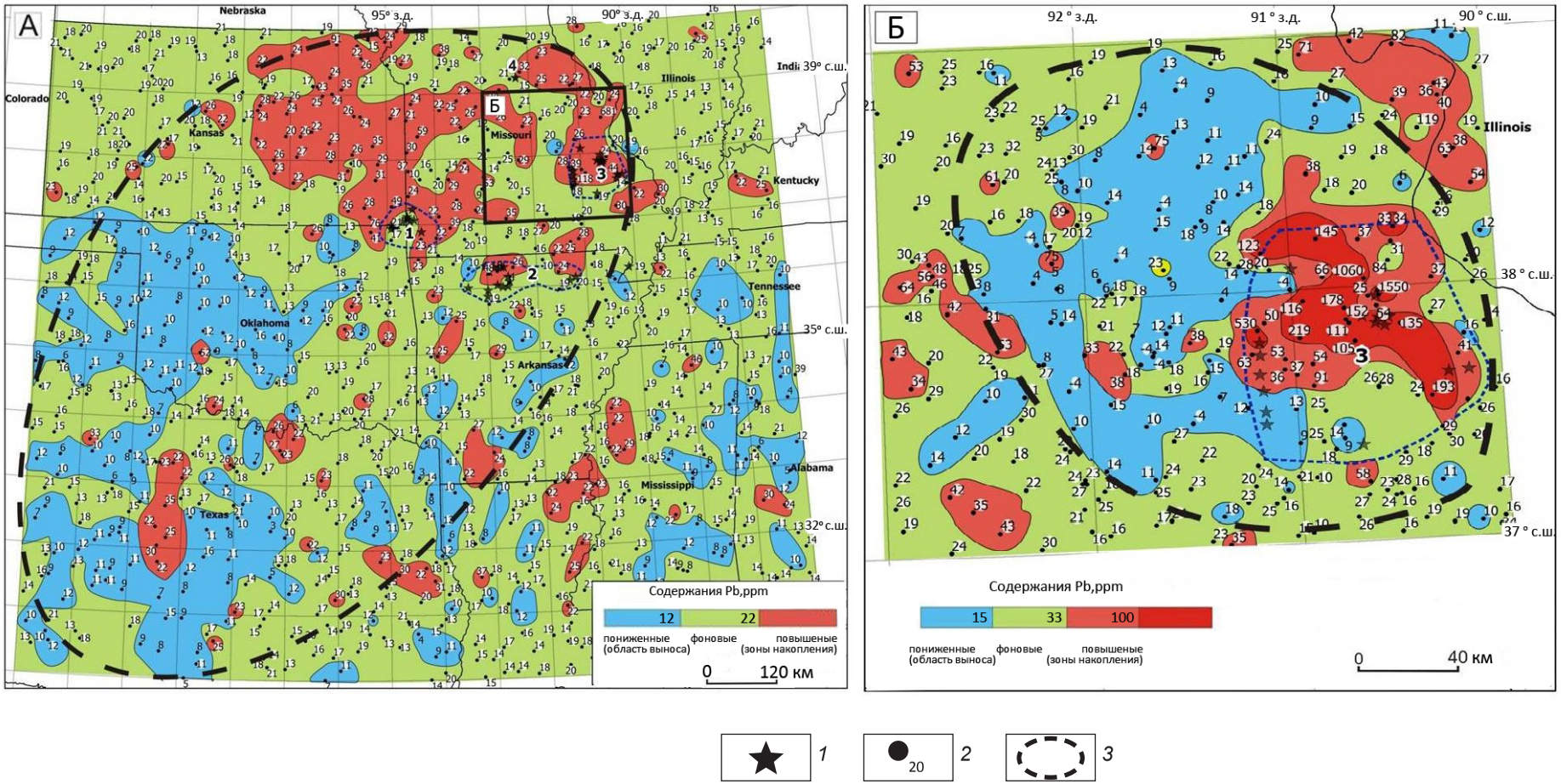


Рис. 2. Геохимические системы рудной провинции Миссисипи (А) и рудного района Southeast (Б):

1 – рудные месторождения; *2* – точки отбора проб; *3* – граница геохимических (металлогенических) систем; 1–3 –рудные кластеры (узлы); рудные районы на А: 1–Tri-State, 2–Northern Arkansas, 3–Southeast region

ческих полях и аномалиях, тектонических нарушениях и др. В недалёком будущем практический интерес для оценки недр будут, возможно, представлять некоторые методы получения информации о физико-химических параметрах геологической среды [27].

С большой вероятностью можно полагать, что ***базовой*** информацией при оценке недр на рудные полезные ископаемые являются данные о ***концентрации химических элементов***. Это самые простые, фундаментальные характеристики геологии. Кроме того, как следует из физической сущности формирования рудных объектов, именно анализ полей концентрации рудных, сопутствующих и антагонистичных к ним элементов должен лежать в основе металлогенических исследований, и он же является наиболее прямым и естественным путём прогнозирования и поисков рудных объектов при оценке недр. Об этом, кстати, свидетельствует и тот факт, что за последние десятилетия 70–80% открытий рудных месторождений основывались на геохимических методах [10, 37].

Важно, что концентрации элементов являются настоящими физическими величинами, допускающими их объективное измерение, формализованное описание, демонстрацию воспроизводимости, определение систематических и случайных отклонений. Существенно, что концентрации определяются по шкале отношений, в которой возможны все алгебраические преобразования и логические операции, а также то, что анализ распределения концентраций допускает детерминированную и вероятностную интерпретацию, позволяя гибко использовать широкий набор математических методов и моделей, что открывает путь к количественной металлогении и цифровому прогнозированию.

Использование при прогнозе и поисках месторождений в качестве базовой информационной основы разномасштабных карт полей валовых концентрации элементов, карт концентраций подвижных форм элементов, выделение в полях концентрации разноранговых геохимических систем рудных объектов может дать скачок в эффективности оценки недр на рудные полезные ископаемые.

Прогнозно-поисковая геохимическая технология Ionex. Эта технология основывается и органически вытекает из металлогенических представлений о формировании рудных объектов в результате иерархически организованного перераспределения элементов в геологической среде «in siti».

Технология Ionex может использоваться как базовая при проведении прогнозно-поисковых работ, ориентированных на выявление рудных объектов с низким статусом открываемости (при работе на открытых, частично открытых и закрытых территориях). Она основана на высокоточных анализах пород и, главное, ***фазовых анализах*** подвижных форм (метод МПФ) рудных, сопутствующих и полярных к ним элементов. На закрытых территориях используются только фазовые анализы. Минимальная плотность точек отбора проб – 1 точка на 1 см^2 карты. Сеть отбора – квадратная или близкая к ней. Данные анализов обрабатываются с помощью авторского программного комплекса ***Elan*** с выделением моно- и полиэлементных структур с выделением геохимических систем рудных объектов разных геохимических ассоциаций. В настоящее время ПК ***Elan*** обеспечивает выполнение следующих основных операций [14]:

1. Структурный статистический анализ распределения содержаний элементов с выделением «уровней концентрации» и естественных границ между уровнями (программа Anhis 2).

2. Построение 2–3D моделей геохимических полей (распределения содержаний элементов по площади работ). Учитывая значительную статистическую и пространственную неоднородность, а также высокую, доходящую до фрактальности, локальную изменчивость содержаний элементов (особенно элементов с малыми кларками) в геологической среде, геохимические поля представляются в форме аппроксимационных моделей. При построении моделей обычно использовались алгоритмы, основанные на принципе «обратного расстояния» (программа Modeling2).

3. Анализ нелинейной взаимосвязи содержаний элементов для выделения геохимических ассоциаций и определения целевой информативности геохимических полей методом вычисления оптимального корреляционного отношения (программа FSON4).

4. Классификации и районирование многомерных данных (в этом случае многомерных геохимических полей) проводится с помощью программы RegSOM. Операция ориентирована на классификацию слабо различающихся данных, когда нет априорной информации о числе классов или о расстояниях между ними. В содержательном плане классификация без априорной информации представляет собой извлечение скрытых в неклассифицированных данных знаний. Потен- циально перспективными считаются районы обогащённые элементами каких-либо рудных геохимических ассоциаций.

5. Построение многомерных нелинейных прогнозных функций в форме «функций суммы одномерных нелинейностей» или нейросетей (программы FSON5 и NNM). Эта операция используется при наличии эталонов прогнозирования.

Основой выполняемых операций служит аппарат математической статистики. Её преимущества (при ряде ограничений) – возможность решать нечётко поставленные задачи, использовать информацию со случайными отклонениями и слабой воспроизводимостью. Собственно выделение геохимических систем рудных объектов и оценка их потенциальной перспективности проводится с использованием процедуры районирования многомерных моделей геохимических полей

и (или) технологии многомодельного метода прогнозирования (при наличии объектов-эталонов).

Решаемые задачи и применимость технологии Ionex:

• ориентирована на прогноз и поиски рудных объектов практически всех металлов, залегающих на глубине до 500–1000 м или перекрытых чехлом рыхлых отложений мощностью до сотен метров;

• применима в различных геологических ситуациях и масштабных диапазонах (от регионального до детального);

• заключается в картировании полей валовых содержаний в коренных и(или) рыхлых породах, содержаний подвижных форм элементов в почвах (анализ МПФ) с выделением по построенным полям геохимических структур (особенно геохимических систем рудных объектов);

• технология используется на нескольких масштабных уровнях, реализуя принципы последовательной детализации геохимических структур и резкого «сжатия» выделяемых потенциально перспективных площадей (примерно в 6–10 раз после каждой стадии работ);

• экономически рентабельна и конкурентоспособна.

Интерпретация полученных результатов обработки данных и моделирования опирается на представления о формировании рудных объектов в рудообразующих системах и методологических следствиях развития систем с самоорганизацией. При интерпретации необходимо использовать информацию о геологическом строении, геофизических полях и другие данные. При интерпретации, на которой основываются рекомендации по направлению дальнейших работ, необходимо сформулировать принимаемые интерпретационные положения и главные факторы, на которых основывается выделение потенциально перспективных площадей. Не исключаются и различные интерпретации получаемых результатов и, соответственно, различные (многовариантные) рекомендации по направлению дальнейших работ.

Накопленный опыт прогнозно-поисковых работ на основе технологии Ionex показал, что при интерпретации получаемых результатов необходимо учитывать и можно опираться на следующие положения:

1. Структуры полей концентрации рудных, сопутствующих, антагонистических к ним и других элементов автономны относительно геологических (породных), геофизических структур и несут самостоятельную информацию об изучаемых средах и системах. Степень автономности геохимических систем приблизительно уменьшается с увеличением кларков элементов.

2. Геохимические системы рудных объектов разных иерархических уровней представляют собой пространственно ассоциирующие области накопления (положительные аномалии) и выноса (отрицательные аномалии) рудных и сопутствующих элементов. Типичные размеры систем: рудные провинции ($n\times10^5$–$n\times10^6$ км^2), зоны ($n\times10^4$ км^2), районы ($n\times10^3$ км^2), узлы ($n\times10^2$ км^2), поля ($n\times10$ км^2), месторождения ($n\times10^0$ км^2) (иерархическая градация рудных объектов даётся по А.А.Головину).

3. Необходимо учитывать, что соотношение площадей, объединённых в геохимическую систему положительных и отрицательных аномалий на поверхности, может не соответствовать реальному соотношению объёмов зон накопления и выноса рудных элементов в пространстве 3D.

4. Перспективность геохимических систем на выявление рудных объектов определяется следующими факторами:

а) чем полнее в зоне накопления представлена какая-либо рудная геохимическая ассоциация элементов и чем выше содержание этих элементов, тем выше перспективность системы;

б) чем большее число элементов извлекается из области выноса и чем ниже их содержание в ней, тем выше перспективность системы;

в) чем теснее в пространстве ассоциируют зоны накопления и области выноса элементов, тем выше перспективность системы.

5. Если в зоне накопления полиметаллов, меди, золота фиксируются пониженные содержания сидерофилов и лантаноидов (вынос данных элементов), а вокруг зон накопления формируются своего рода «рубашки» повышенных содержаний этих элементов, то это повышает перспективность системы (для зон рудных геохимических ассоциаций А, В, С).

6. Рудные объекты располагаются в зонах накопления или на их ближней периферии.

7. С одной областью выноса элементов могут быть связаны несколько зон накопления, представляющих одну или разные рудные геохимические ассоциации.

Конечно, при интерпретации и оценке потенциальной перспективности геохимических систем рудных объектов и выделяемых площадей (участков) необходимо учитывать данные геологического картирования, геофизики, дистанционного зондирования Земли, специальных исследований. В целом же при интерпретации необходимо держаться подхода, сформулированного А.Эйнштейном и Л.Инфельдом [33]: ***если какую-то закономерность можно интерпретировать на основе случайного сочетания событий (факторов) или для интерпретации вводятся какие-то специальные условия, то такие трактовки по своему достоинству ниже, чем интерпретации на основе неких более общих и фундаментальных законов или устойчивых закономерностей.***

Применение технологии Ionex в Казахстане. Геохимическая технология Ionex в качестве базового метода прогнозно-поисковых работ на полиметаллы, медь, золото использовалась в регионах Казахстана, представленных в табл. 2.

Во всех регионах проведённые работы по картированию геохимических полей и их интерпретация позволили выявить новые закономерности в размещении

2. Применение технологии Ionex в Казахстане

Регионы, районы	Площадь работ (в км^2)	Масштаб	Заказчик работ
Лениногорский и Зыряновский районы Рудного Алтая	24 000	1:500 000 и 1:100 000	ТОО «КазЦинк», 2005–2007 гг.
Западный Торгай	11 000	1:500 000 и 1:100 000	ТОО «КазЦинк», 2007–2008 гг.
Жезказганский рудный регион	137 000	1:1 000 000	Комитет геологии и недропользования МИР РК, 2014–2015 гг.
Спасская меднорудная зона (Центральный Казахстан)	12 000	1:200 000 и 1:50 000	ТОО «СП «Тау-Кен Проект», 2015–2017 гг.

рудных объектов и выделить новые потенциально перспективные на золотое, медное и полиметаллическое оруденение площади [19, 31].

Так, в Лениногорском и Зыряновском районах (Рудный Алтай) была установлена региональная закономерность по приуроченности практически всех колчеданно-полиметаллических месторождений к геохимическим эпицентрам, расположенным на пересечении СЗ и широтных геохимических полос, связанных, вероятно, с регматическими структурами и расположенных на расстоянии 60 км друг от друга (см. рис. 2 в работе [31]). Была выделена новая широтная геохимико-металлогеническая Нарымская зона, в западной части которой последующими работами выявлен довольно крупный, но с очень низкими содержаниями большеобъёмный золоторудный объект [2].

В Жезказганском рудном регионе выделены зоны накопления подвижных форм элементов медной ассоциации ***B*** (Cu, Ag, Sb, Pb, Re) и золоторудной ассоциации ***C*** (Au, Te, W, Ag, Sb). Значительная площадь развития ассоциации ***B*** фиксируется в районе известного Жезказганского медного месторождения, а ассоциации ***C*** – в 200 км к ЮЮЗ от этого месторождения (Южно-Карсакпайская площадь) [20]. Обе площади приурочены к бортам Чу-Сарысуйского бассейна и, вероятно, связаны с общей зоной выноса (порядка 20 000 км^2), характеризующейся пониженными содержаниями элементов медной и золоторудной ассоциаций, а также сидерофилов (рис. 3).

Особый интерес на выявление нового крупного золоторудного района представляет Южно-Карсакпайская площадь в Жезказганском рудном регионе. На этой площади, полностью перекрытой рыхлыми отложениями мощностью до 100 и более метров, совместились большая зона (2000–2500 км^2) повышенных содержаний подвижных форм элементов золоторудной ассоциации с «незаполненной вакансией» крупного золоторудного района [20]. Эта «вакансия» была выделена на основе проведённого анализа средних кратчайших расстояний между крупными эпицентрами плотности оруденения (рудными районами) разных металлов на территории Казахстана и Средней Азии (табл. 3) и установленной закономерностью «разбегания» крупных рудных объектов в пространстве (рис. 4) [20, 29].

Совмещение потенциально перспективных площадей, выделение которых проведено на различных и независимых основаниях (случайность такого совмещения <0,2%), значительно повышает вероятность существования в этом месте ***нового золоторудного района*** и указывает на необходимость проведения дальнейших прогнозно-поисковых работ.

Концепция нового технологического направления прогнозно-поисковых работ на рудные полезные ископаемые. Рассмотренные теоретико-методологические, информационные и технологические основы прогнозно-поисковых работ на основе геохимической технологии Ionex, накопленный в Казахстане опыт использования данной технологии позволили сформировать ***схему нового технологического «мейнстрима» прогнозно-поисковых работ*** на рудные полезные ископаемые на территории Казахстана [21, 22] (табл. 4).

На региональных этапах I и II, кроме картирования геохимических полей, используется информация о региональных геологических и геофизических структурах. На локальном этапе III добавляется ДЗЗ, а на детальном этапе IV – электроразведочные работы (вид и объёмы дополнительных к геохимическому картированию работ определяются в зависимости от конкретной геолого-информационной ситуации на конкретном участке).

Наиболее важным и во многом определяющим успешное выполнение всей программы является I-ый региональный (глобальный) этап. Региональные работы должны выполняться на площади 1,4–2 млн. км^2 (на всей территории Казахстана или только на территории свободной от мощного чехла рыхлых отложений).

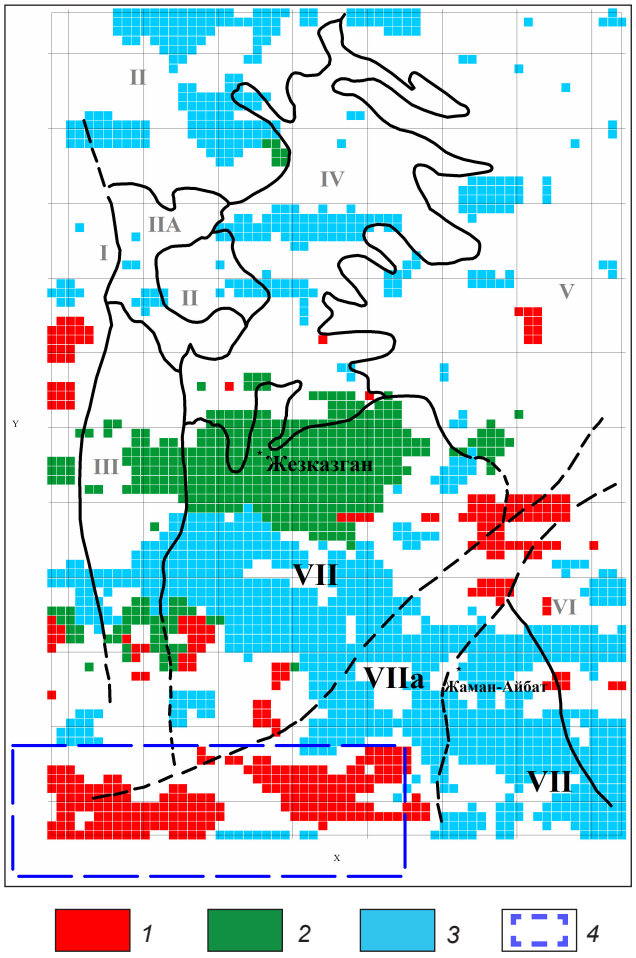


Рис. 3. Схема геологического и геохимического районирования Жезказганского рудного региона:

геохимические районы: *1* – обогащённые элементами золоторудной ассоциации (Au, Te, W, Ag, Sb), *2* – обогащённые элементами меднорудной ассоциации (Cu, Ag, Pb, Sb, Re), *3* – обеднённые элементами золоторудной, меднорудной ассоциаций и сидерофилами (область выноса); *4* – Южно-Карсакпайская площадь (14 000 км^2), перспективная на выявление золоторудного района; I–VI – структурно-формационные районы, сложенные протерозой-палеозойскими комплексами (I – Байконурский, II – Улытауский, IIA – Южно-Улытауский, III – Касакпайский, IV – западный Сарысу-Тенизский, V – восточный Сарысу-Тенизский, VI – Чу-Илийский); VII – Чу-Сарысуйский бассейн, сложенный пермскими и мезо-кайнозойскими отложениями (VIIa – пески старого русла р. Сарысу)

Выполнение этого этапа работ создаёт фундамент для работ всех последующих стадий. Заметим, что на площадях, где были проведены прогнозно-поисковые работы по технологии Ionex, уже сейчас можно ставить исследования III–IV этапов (например, в Жезказганском рудном регионе и Спасской меднорудной зоне на золото и медь).

Любой технологический «мейнстрим» может существовать, развиваться и оставаться конкурентоспособным, если он ***постоянно поддерживается новыми научно-технологическими разработками***. Это относится и к рассматриваемому направлению прогнозно-поисковых работ на основе геохимической технологии Ionex.

Для более полного извлечения целевой информации и знаний из данных необходимо сформировать ***технологию цифрового прогнозирования*** рудных полезных ископаемых, которая обеспечит более точную количественную оценку прогнозных ресурсов. Главные требования к технологии цифрового прогнозирования:

• *системность* с охватом основных процедур прогноза рудных объектов;

• *практическая применимость* в широком диапазоне геологических условий и масштабов работ;

• *ориентация* разработок не только на внутренний, но и на внешний рынки геологоразведочных технологий.

Общая схема цифрового прогнозирования и наработки (идеологические, математические, программные) по выполнению отдельных операций в настоящее время уже созданы.

Кроме выполняемых в настоящее время операций, для реализации цифровой технологии прогнозирования в ПК Elan предполагается включить следующие процедуры:

1. Описание и использование при прогнозировании ***взаимосвязи пространственных переменных***. Прогнозирование полезных ископаемых (или «косвенные» поиски) в любом случае основывается на взаимосвязи свойств геологической среды. Анализ и описание силы и формы связи между целевыми X и прогнозирующими (косвенными) Y характеристиками в настоящее время производится с помощью статистических критериев. Перспективным направлением здесь является методика анализа взаимосвязи с учётом их пространственной природы на основе следующего функционала:

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

где $S(Y_b)$, $S(X_b)$ – длины, площади или объёмы, в которых характеристики Y и X больше Y_b и X_b; $\cap$ – символ пересечения множеств; $\cup$ – символ объединения множеств; $i(Y_b)$, $i(X_b)$ – Шенноновская информативность ($i= -\ln P$).

Распределение величин CEN в координатах Y_b–X_b (Y_b от minY до maxY, X_b от minX до maxX) создаёт поле чисел, описывающих силу и формы взаимосвязи между характеристиками Y и X, что, в принципе, позволяет извлекать гораздо больше целевой информации и знаний из данных по сравнению со статистическими критериями.

2. Цифровое описание ***систем диффузионного типа*** (сред, систем, объектов с плохо организованной структурой). В таких средах, системах и объектах сложно, а иногда невозможно разграничить влияние разно-

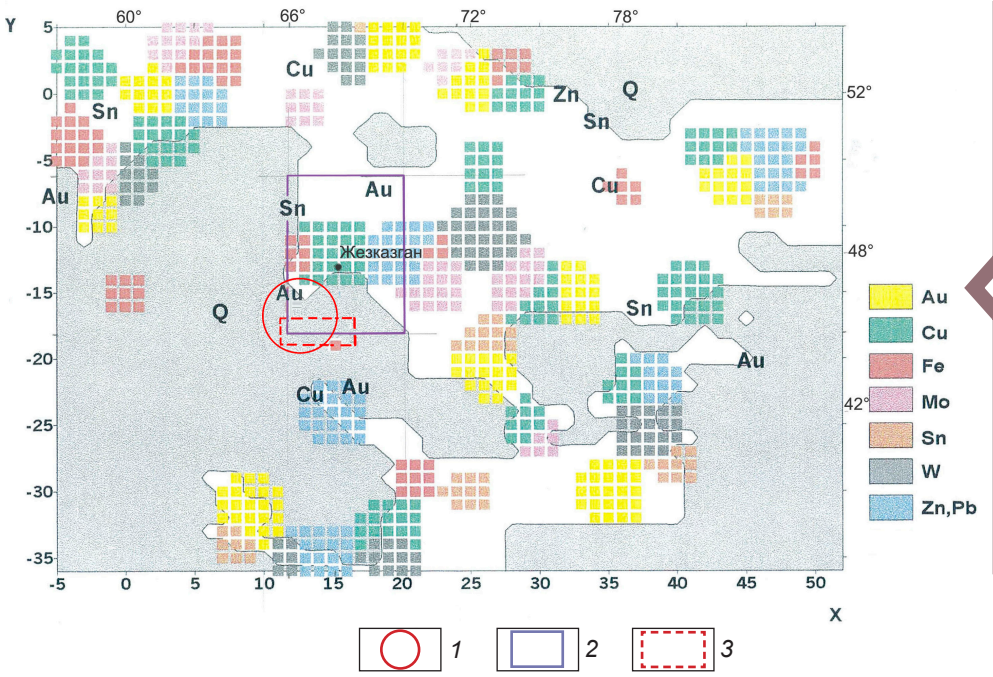


Рис. 4. Схема размещения на территории Казахстана и Средней Азии эпицентров плотности оруденения (рудных районов) Au, Cu, Fe, Mo, Sn, W, Zn и Pb:

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

родных факторов, выделить уровни иерархической организации и даже определить их внешние границы. При описании диффузных систем, их моделировании, прогнозе организации и поведения необходимо учитывать действия очень многих разнородных по своей природе процессов и факторов. 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.

3. ***Томография скалярных геохимических полей.*** Проблема томографии геологических сред на базе поверхностных опробований, интерпретируемых как скалярные поля, не получила решения на настоящий момент. 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. 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 [25].

3. Средние кратчайшие расстояния между эпицентрами плотности оруденения

Эпицентры металлов	Число эпицентров	R	Rсл	R/Rсл
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); Rсл – средние кратчайшие расстояния между случайно расположенными точками (км).

4. Схема выполнения прогнозно-поисковых работ

Этапы	Основной масштаб	Выделяемые объекты	Получаемые знания	Изучаемые площади
I. (2020–2022 гг.)	1:2 500 000 (региональный)	Рудные районы, крупные рудные узлы	Новые знания по металлогении Казахстана	Изучается вся территория Казахстана, где мощность рыхлых отложений меньше 300–400 м
II. (2021–2026 гг.)	1:500 000 (региональный)	Рудные узлы, участки крупных месторождений	Новые знания по металлогении рудных и потенциально рудных районов	Изучаются 9–12 площадей, соответствующих рудным районам или крупным рудным узлам (20–30% площади работ этапа I)
III. (2023–2029 гг.)	1:200 000–1:100 000 (локальный)	Небольшие рудные узлы, участки месторождений	Новые знания о количественных закономерностях локализации месторождений и рудных зон	На каждой площади изучаются 4–10 участков, выделенных как перспективные на этапе II (всего 40–60 участков)
IV. (2024–2030 гг.)	1:25 000 (детальный)	Месторождения, рудные зоны		Изучается по 1–3 объекта на каждом из участков работ этапа III

4. Элементы ***искусственного интеллекта*** (ИИ) для выделения и оценки рудообразующих систем. Уже созданный и предлагаемый для создания объём научно-технологических и программных разработок в сфере прогнозно-поисковых работ на рудные полезные ископаемые может послужить основой для создания первичных версий ИИ. При этом следует отметить, что создание искусственного интеллекта не является самоцелью. Он необходим для экономии производственных и финансовых ресурсов при осуществлении геологоразведочных операций оценки недр. Алгоритмическая основа специализированного ИИ в области геологии (геохимии) может опираться на теории распознавания образов и нейросетей с использованием «генератора случайностей». При этом понятие «образ» понимается в широком смысле слова. Например, цифровой материал, полученный в результате построения карт геохимических полей, результаты районирования и томографических расчётов плюс оцифрованные геология модели (знания) и образ объекта диффузного типа плюс цифровые образы различных поисковых и оценочных критериев и многих других цифровых параметров, составляющие разные грани распознаваемого объекта. 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 которых традиционными методами затруднительно. Искусственный интеллект будет помогать принимать решения о перспективности «рудных» подсистем благодаря синтезу, анализу и визуализации информации.

5. Математическое и компьютерное ***моделирование механизмов образования и размещения рудных объектов*** различных иерархических (масштабных) уровней. Все алгоритмические и технологические разработки в сфере цифрового прогнозирования на основе геохимических данных должны поддерживаться математическим и компьютерным моделированием механизмов образования и размещения рудных объектов различных иерархических уровней, являясь своего рода инструментом обеспечения знаниями и решения практически всех операций цифрового прогнозирования. И хотя в этой области мы находимся в самом начале пути, построение даже простейших моделей рудообразования уже дало интересные и нетривиальные результаты [17].

В **заключение** следует отметить, что, формируя стратегию и тактику оценки недр на рудные полезные ископаемые в новой геологоразведочной ситуации, необходимо

объективно проанализировать реальное состояние прогнозно-поисковых исследований и наметить новые пути, принципиально повышающие их эффективность и качество. Перспективными направлениями при оценке недр на рудные полезные ископаемые являются:

• *области научно-методологического обеспечения*: преобразование металлогении в количественное, прогностически ориентированное научное направление путём её синтеза с геохимией на основе системно-синергетической методологии и новой информации о структурах разномасштабных полей концентрации элементов; расшифровка и моделирование механизмов рудообразования с использованием фундаментальных представлений физики, химии и компьютерных технологий;

• *в области информационного обеспечения*: качественное развитие информационной базы за счёт разномасштабного картирования полей концентрации элементов с использованием высокочувствительных анализов, методов фазовой геохимии (определение «подвижных» форм нахождения элементов) и выделением моно- и полиэлементных структур (прежде всего, геохимических систем рудных объектов);

• *в области технологии обработки информации и знаний*: развитие методов извлечения целевой информации и знаний из данных о свойствах геологической среды; разработка и использование цифровых технологий прогнозирования, обеспечивающих объективную, несмещённую и достаточно точную оценку недр с определением прогнозных ресурсов.

Рассматривая различные аспекты оценки недр, авторы не претендуют на исключительность или безальтернативность своих взглядов и предложений, а стараются лишь привлечь внимание к накопившимся проблемам и необходимости поиска новых подходов, идей и методов при решении задач прогноза и поисков новых месторождений. Только новые знания и информация, а также современные цифровые прогнозно-поисковые технологии смогут обеспечить принципиальное повышение эффективности оценки недр на рудные полезные ископаемые. В частности, новое направление оценки недр на основе прогнозно-поисковой геохимической технологии Ionex и методов цифрового прогнозирования должно привести к следующим результатам:

• повысить инвестиционную привлекательность недр за счёт получения более надёжных оценок их потенциальной перспективности;

• привести к выявлению нескольких значимых скрытых месторождений (для территории Казахстана);

• будет стимулировать развитие цифровых и природоподобных технологий с превращением их в экспортный продукт.

Конечно, решение научно-методологических, информационных, технологических проблем для повышения эффективности оценки недр на рудные полезные ископаемые потребует одновременного решения некоторых организационных, управленческих и нормативно-правовых вопросов, но это уже тема специального обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бадалов С.Т.* Геохимические особенности рудообразующих систем. – Ташкент, 1999.
2. *Бегаев И.В.*, *Назаров В.Н.*, *Шатов В.В.* Полигенно-комплексные месторождения порфировых систем в Нарымском районе Рудного Алтая (ВКО) // Геология и охрана недр. 2015. № 4(57). С. 2–10.
3. *Гольдберг И.С.* Геоэлектрохимическое извлечение элементов из горных пород и энергия рудообразования. Сафроновские чтения. – СПб., 1993. С. 135–151.
4. *Гольдберг И.С.*, *Абрамсон Г.Я.*, *Лось В.Л.* Поиски рудных объектов на основе полярной зональности геохимических систем // Прикладная геохимия. Вып. 3. Прогноз и поиски. – М., 2002. С. 305–323.
5. *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.
6. *Гольдберг И.С.* Рудообразование в геоэлектрохимических системах // Геология и охрана недр. 2005. № 2(15). С. 28–40.
7. *Гольдберг И.С.*, *Абрамсон Г.Я.*, *Лось В.Л.* Геохимический образ рудных объектов – от региональных до локальных – основа прогноза и поисков месторождений по технологии Ionex // Разведка и охрана недр. 2013. № 8. С. 12–16.
8. *Горяинов П.М.*, *Иванюк Г.Ю.* Самоорганизация минеральных систем. – М.: ГЕОС, 2001.
9. *Концепция* развития геологической отрасли Республики Казахстан до 2030 года. – Астана, 2012.
10. *Кременецкий А.А.* Принципы и технология разномасштабных прогнозно-поисковых геохимических работ // Поисковая геохимия: теоретические основы, технология, результаты. – Алматы, 2004. С. 13–25.
11. *Кривцов А.И.* Прикладная металлогения. – М.: Наука, 1989.
12. *Летников Ф.А.* Синергетика геологических систем. – Новосибирск: Наука, 1992.
13. *Летников Ф.А.* Флюидный режим эндогенных процессов в континентальной литосфере и проблемы металлогении // Материалы теоретического семинара ОГГГИ РАН, 1998–1999. – М.: ГЕОС, 2000. С. 204–224.
14. *Лось В.Л.*, *Гоберник И.А.*, *Иоффе А.Л.* Программный комплекс ELAN // Математические методы решения задач моделирования и прогнозирования в геологии. – Алматы, 1994. С. 78–88.
15. *Лось В.Л.* Самоорганизация в геологических системах: общие принципы, методологические и прикладные исследования // Геология и охрана недр. 2005. № 1(14). С. 75–80.

16. *Лось В.Л.* Металлогенические системы и механизмы рудообразования // Геология и охрана недр. 2005. № 4(17). С. 28–36.
17. *Лось В.Л.*, *Гоберник И.А.*, *Мурзадилов Т.Д.* Имитационное моделирование процессов рудообразования // Руды и металлы. 2011. № 3–4. С. 116–117.
18. *Лось В.Л., Нарсеев В.А., Старостин В.И.* Проблемы оценки недр на рудные полезные ископаемые // Геология и охрана недр. 2015. № 1(54). С. 75–83.
19. *Лось В.Л.*, *Дегенбаева М.С.* Новые представления о металлогении и перспективах Жезказганского рудного региона // Геология и охрана недр. 2016. № 1(58). С. 18–36.
20. *Лось В.Л.*, *Дегенбаева М.С.* Перспективы выявления нового золоторудного района в Казахстане // Геология и охрана недр. 2016. № 4(61). С. 12–16.
21. *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.
22. *Лось В.Л.*, *Ужкенов Б.С.* Оценка недр на рудные полезные ископаемые: состояние, проблемы, возможности // Горный журнал Казахстана. 2019. № 3. С. 18–23.
23. *Минерально-сырьевая* база меди, свинца, цинка, золота Республики Казахстан. Состояние, прогноз развития / Б.С.Ужкенов, М.А.Сайдуакасов, А.К.Мазуров, Е.М.Селифонов // Сырьевая база свинца и цинка, меди и золота Казахстана. – Алматы, 2002. С. 4–5.
24. *Мулагулов И.А.* Оценка достоверности определения целевой функции при прогнозе полезных ископаемых с помощью имитационного моделирования // Принципы, методы и опыт прогнозирования и оценки прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. – Алма-Ата, 1988. С. 33–42.
25. *Мурзадилов Т.Д.*, *Гринштейн Ю.А.* Принципы газовой томографии геологической среды: материалы международной научно-практической конференции «Инновации и перспективные технологии геологоразведочных работ в Казахстане», 16–17 марта. – Алматы, 2017.
26. *Нарсеев В.А.* Структурирование геологического пространства (в поисках новой парадигмы геологии) // Геология и охрана недр. 2007. № 1(22). С. 15–18.
27. *Нарсеев В.А.*, *Петровский А.Д.* Нормализованные массэнергетические показатели комплексов среды рудоотложения. Препринт.– М., Изд-во РАЕН, 1993.
28. *Овчинников Л.Н.* Образование рудных месторождений. – М.: Наука, 1988.
29. *Прогноз*, поиски и моделирование рудных объектов // Комплексная переработка минерального сырья Казахстана. Т. 1а. – Алматы, 2008.
30. *Распределение* средних концентраций элементов в рудных месторождениях: статистика, корреляция, классификация / В.Л.Лось, В.С.Горяева, В.С.Легонькин, О.В.Самохвалова // Геология и охрана недр. 2009. № 4(33). С. 32–42.
31. *Технология* IONEX при прогнозно-поисковых работах (Рудный Алтай / В.Л.Лось, Г.Я.Абрамсон, И.С.Гольдберг, В.Н.Назаров // Разведка и охрана недр. 2014. № 3. С. 14–22.
32. *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: ВКГТУ, 2018. С. 307–313.
33. *Эйнштейн А.*, *Инфельд Л.* Эволюция физики. – М.: Наука, 1965.
34. *Geoelectrochemical* Exploration: Principles, Practice and Performance. Recourcing the 21st Century / I.S.Goldberg, G.J.Abramson, C.O.Haslam, V.L.Los. – Australia, Ballarat, 1997. P. 193–199.
35. *Goldberg I.S.*, *Abramson G.Y. and Los V.L.* Depletion and enrichment of primaru haloes: their importance for mineral deposits // Journal Geochimical Exploration. Environment, Analysies. 2003. Vol. 3. P. 281–293.
36. *Satu M.*, *Mooney N.* The electrochemical mechanism of sulphide self – potential Geophys. 1960. Vol. 25. № 1. P. 226–249.
37. *Wang Xuegin*, *Xie Xuejing* Cheochemical Mapping: Implications for Mineral Exploration and Assessment // Поисковая геохимия: теоретические основы, технология, результаты. – Алматы, 2004. С. 26.