

Рис. 5. Диаграммы U-Pb систем с конкордиями для цирконов из жильных образований дайковой серии

тые, прозрачные и полупрозрачные призматические кристаллы циркона длиной 72–197 мкм ($K_u = 1,1–1,7$), характеризующиеся ярким свечением, с грубой и секториальной зональностью в катодолюминесцентном изображении. Содержания урана и тория соответственно 150–833 г/т и 108–366 г/т ($Th/U = 0,45–0,74$).

Абсолютный возраст монцогаббродиорита и гранит-порфира по конкордии составил $279 \pm 1,3$ Ма и 277 ± 2 Ма соответственно (рис. 5).

Выводы:

1. Изложенные данные свидетельствуют о раннепермском времени формирования Астайской ВКС ($291–287$ Ма), а именно ее типовых вулканических и субвулканических пород, считавшимися мезозойскими (юрскими).

2. Установлена одновозрастность и обоснована комагматичность вулканогенных образований Астайской ВКС с гранитоидами соготинского комплекса ($290–283$ Ма) и завершающими жильными образованиями дайковой серии ($279–277$ Ма). В практике геологосъемочных работ подобные вулканогенные образования относятся к алентуйскому вулканическому комплексу и выделяются совместно с гранитоидами соготинского комплекса в составе единой алентуй-соготинской вулканоплутонической ассоциации [2]. Можно заключить, что в результате проведенных исследований на основе новейших геохронологических данных было обосновано раннепермское (артинско-кунгурское) время формирования алентуй-соготинской вулканоплутонической ассоциации и непосредственно алентуйского вулканического комплекса.

3. Алентуйский вулканический комплекс является рудоносным и рудовмещающим в пределах Астайской ВКС. Предполагается генетическая связь флюидно-эксплозивной деятельности со становлением охарактеризованной вулcano-купольной структуры и, таким образом, пермский возраст полиметаллического оруденения в брекчиевых трубках, что имеет важное прогнозно-поисковое значение при оценке подобных вулканоструктур Западно-Забайкальского вулканоплутонического пояса.

4. Остается открытым вопрос о возрасте уранового оруденения Астайской ВКС. В Таширском ураново-

рудном районе, опираясь на данные ФГБУ «ВИМС» (Чесноков Л.В., 2012) и АО «Сосновгео» (Зайцев С.У. и др., 2015), установлены три урановорудные стадии: две основные мезозойские (юрско-меловые) и ранняя позднепалеозойская (пермская) в продуктах кремнещелочного метасоматоза в связи с гранитами соготинского комплекса (Наранский массив). Последнее обстоятельство не исключает потенциальную урано-

носность и вулканических производных алентуй-соготинской вулканоплутонической ассоциации, что подтверждается геологической позицией урановых объектов в Астайской ВКС.

Авторы искренне признательны главному научному сотруднику Шарпенко Л.Н. и ведущему научному сотруднику Кухаренко Е.Н. отдела петрологии ФГБУ «ВСЕГЕИ» за консультации и квалифицированные петрохимические исследования.

Работа выполнена в составе объекта ФГБУ «ВСЕГЕИ» «Проведение в 2017–2019 годах региональных геолого-съемочных работ масштаба 1:200 000 на группу листов в пределах Сибирского федерального округа».

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Алдано-Забайкальская серия. Лист М-48 (Улан-Удэ). Объяснительная записка. — СПб.: Изд-во картфабрики ВСЕГЕИ, 2009. — 276 с.
2. Легенда Селенгинской серии листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 (издание второе). — Улан-Удэ: ГФУП «Бурятгеоцентр», 1999. — 185 с.

© Макарьев Л.Б., Рассолов А.А., Моргун Э.В., 2017

Макарьев Леонид Борисович // Ogmur@vsegei.ru
 Рассолов Александр Александрович // Aleksandr_Rassolov@vsegei.ru
 Моргун Эрнест Владимирович // Ernest_Morgun@vsegei.ru

УДК 550.84+550.8.05+551.2.03

Мезенцева А.Е. (Восточный научно-исследовательский институт золота и редких металлов, ООО «ВНИИ-1»)

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ: ФАЗОВО-СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К ГЕОХИМИИ

Изложены фазово-структурные исследования числовых геохимических моделей золотосульфидного месторождения. Посредством фазовых траекторий выявлена конвергенция содержаний химических элементов по направлению к рудным зонам, сопровождающаяся вращением лучей конвергенции. Показано, что конвергентно-узло-

вые структуры являются фазовым местом оруденения. Впервые определены критерии оруденения на основе геохимической динамики фазового пространства. Ключевые слова: фазовые траектории, циркуляция, вихревая динамика, геохимическая конвергенция, узловая структура, золото, рудное месторождение.

Mezentseva A.E. (Eastern Research Institute of the Gold and Rare Metals, VNII-1)

GEOCHEMICAL DYNAMICS OF GOLD DEPOSIT: PHASE-STRUCTURED APPROACH TO GEOCHEMISTRY

Structure research of geochemical numerical models for a gold and sulphide deposit is presented. Convergence of chemical elements composition towards ore zones accompanied by rotating convergence rays is revealed through phase trajectories. It is shown that convergence and nodule structures are phase spots of mineralization. Dynamic criteria of ore mineralization based on geochemical dynamics of phase space are defined. Keywords: phase trajectory, circulation, vortex dynamics, geochemical convergence, nodule structure, gold, ore deposit.

Фазово-структурный метод разработан для исследования числовых моделей месторождений с целью локального прогнозирования оруденения, апробирован на петрофизическом [4, 6] и геохимическом [5] материале нескольких месторождений и показал определенные преимущества использования на таких сложных объектах, как месторождения золота и серебра, руды которых и околорудные метасоматиты не аномальны по многим измеряемым характеристикам. При этом было выяснено, например, что определенные структуры в системе электрических и магнитных характеристик пород могут служить критериями оруденения и при этом обладают свойством вращения как в фазовом, так и в геометрическом пространстве. Целью исследования является выяснение фазово-структурным методом геохимической макроструктуры (масштаб 1:10 000) и динамики месторождения и, как следствие, определение динамических критериев оруденения. В качестве исходной информации использовались числовые модели месторождения, представленные серией вертикальных разрезов и погоризонтных планов в изолиниях, построенных по регуляризованному массиву осредненных содержаний широкого круга химических элементов. Решались задачи: 1) выявление типов структур и их динамики в двумерном фазовом пространстве содержаний (рудогенных) химических элементов; 2) отображение динамики фазовых структур в геометрическом пространстве (в разрезе) месторождения; 3) составление схемы структурно-динамического формирования месторождения и определение динамических критериев оруденения.

Месторождение относится к золото-(мышьяковисто)-сульфидной вкрапленной базовой рудной формации [1, 3], сформировалось в периферийной части одной из интрузивно-купольных структур перивулканической зоны Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП). В районе преобладают терригенно-осадочные отложения триаса мезозойского миогео-

синклинального комплекса, подвергнутые зеленосланцевому метаморфизму. В купольных структурах, связанных с гранитоидными интрузиями, одна из которых (Кукенейская интрузия) находится в 8 км восточнее месторождения, метаморфизм достигает стильпномелановой субфации. Подобные проявления прогрессивного метаморфизма сопровождают рудное поле описываемого месторождения. Геологическое описание, схематическая геолого-структурная карта и разрез исследуемого золоторудного месторождения приводятся в работах [1, 3], а также [4].

Методика. Геохимическое опробование пород проведено по сети скважин, канав и подземных горных выработок, составлены моноэлементные числовые модели в масштабе 1:10 000. Интервал опробования составил от 1 до 10 м в зависимости от сложности геологического разреза при среднем расстоянии между скважинами 200 м и расстоянии между буровыми профилями 160 м. Рудные пробы не включались в геохимический массив данных, исследованы только рудовмещающие породы. Было отобрано и проанализировано на широкий круг химических элементов более 16 тысяч образцов (проб), для каждого определены координаты X , Y , Z . Измерения содержаний химических элементов (преимущественно спектральный анализ) производились в специализированных лабораториях производственного объединения «Севостгеология» с использованием стандартной аппаратуры. В генеральных совокупностях значения содержаний химических элементов полимодальны, имеют распределения, близкие к логнормальным, поэтому в построениях используются натуральные логарифмы их значений.

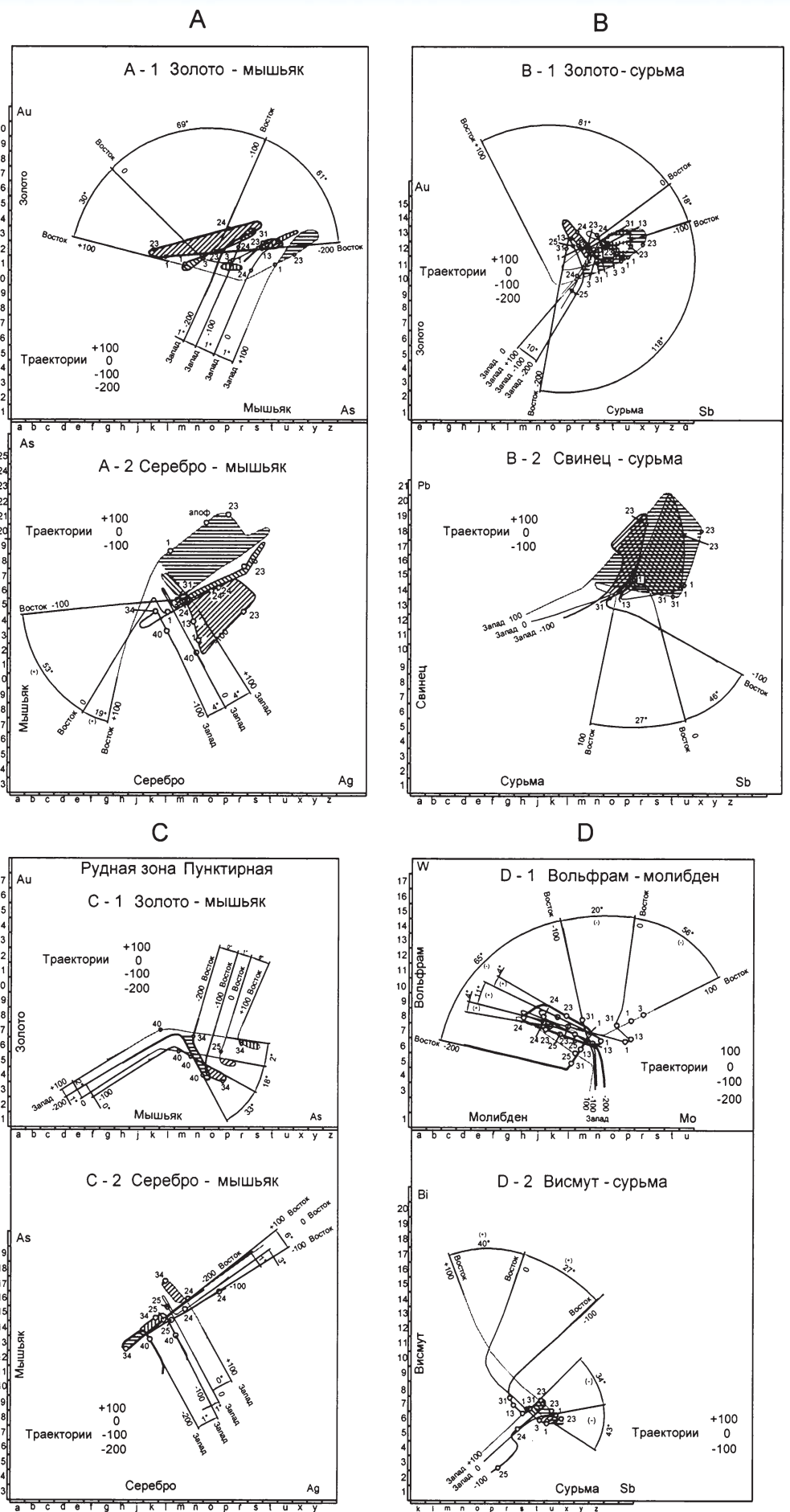
Фазово-структурный метод исследования числовых моделей месторождений заключается в последовательности операций [4, 6], включающих: а) регуляризацию исходных данных; б) построение планов и разрезов изолиний осредненных значений; в) построение спектров их значений и фазовых траекторий в выбранном направлении; г) систематизацию фазовых траекторий по типам, выяснение отношения к оруденению и последующую геометризацию фазовых структур по их характерным элементам, в том числе трассирующим рудные зоны. Совокупность траекторий определенного типа является фазовым описанием, или фазовым портретом некоей геохимической структуры. На планах и разрезах (т.е. в геометрии) в изолиниях одного из химических элементов эти структуры выражены неявно, но в двух элементах их уже можно оконтурить сначала как структуры фазовые, а затем «геометризовать» и получить геохимические структуры на планах и разрезах. Исследование динамики фазовых и геометрических структур потребовало разработки некоторых дополнительных методических приемов, которые будут описаны по мере решения поставленных задач.

1. Выявление типов структур и их динамики в двумерном фазовом пространстве содержаний (рудогенных) химических элементов. Выполним преобразования числового массива каждой выбранной пары химических элементов по вышеперечисленным пунктам.

Для разреза по буровой линии 28 построим траектории вдоль горизонтов (через 100 м) в содержаниях двух выбранных химических элементов (пример построения траекторий см. в работе [6]). Поскольку для исследуемого месторождения характерна золото-мышьяковисто-сульфидная минерализация с серебром и существенным присутствием антимонита (Sb_2S_3), химическим элементам Au, Ag, As, Sb уделено первоочередное внимание. На рис. 1 приведены типичные фазовые траектории, пересекающие рудные зоны Главную и Тундровую, в нескольких системах пар элементов: Au-As, Ag-As, Au-Sb, Pb-Sb (рис. 1 A, B), а также Bi-Sb, W-Mo (рис. 1 D). Представлены также фазовые траектории, типичные для рудной зоны Пунктирной, находящейся западнее основных рудных зон (рис. 1 C).

На рис. 1 видно, что содержания всех пар химических элементов имеют со стороны востока *конвергенцию* содержаний элементов — схождение траекторий к *узлам конвергенции*, в которых сосредоточены рудные тела. *Лучи конвергенции* на всем своем протяжении рудных тел не встречаются. Важной особенностью является *вращение лучей конвергенции*, т.е. их тенден-

Рис. 1. Конвергентно-узловые фазовые траектории рудных зон в системах двух химических элементов: A, B — зона Главная (рудные тела 1, 3, 31, 13, 23) и Тундровая (рудные тела 24, 25); A-1 — золото — мышьяк, A-2 — серебро — мышьяк; B-1 — золото — сурьма, B-2 — свинец — сурьма; C — рудная зона Пунктирная (рудные тела 34, 40, 42); C-1 — золото — мышьяк, C-2 — серебро — мышьяк; D-1 — вольфрам — молибден, D-2 — висмут — сурьма



циозные повороты от траектории к траектории. В совокупности рудные зоны представляют собой *конвергентно-узловые фазовые структуры*. Это основной тип фазовых структур месторождения, наблюдающийся во всех химических элементах, исследованных попарно.

Полезный компонент, золото, имеет низкий кларк, образует небольшое число собственных минералов и находится преимущественно в виде изоморфной примеси в минералах других, более распространенных элементов. Мышьяк или сурьма — представители минералов-носителей золота. Арсенопирит тонкоиглочатый (из штучных и из технологических и валовых проб) содержит от 181–302 до 1299–1594 г/т золота, а серебра — от единиц до 880 г/т. Антимонит содержит от 0.01–3.3 до 9–15 г/т золота, серебра 0.4–22 до 56–78 г/т, галенит из кварц-сульфидных жил содержит золота 0.4–1.3 г/т, серебра 319–1200 г/т. В сульфидантимонитах свинца из кварц-сульфидных жил 0.9–4.8 г/т золота, серебра 854–2697 г/т [3].

Пара элементов Au-As (рис. 2 А-1) в фазовых конвергентно-узловых структурах имеет узкие вытянутые узловые части по сравнению с широкими или, наоборот, небольшими, но изометричными узлами в парах Ag-As или Au-Sb (рис. 1 А-2, В-1). Вытянутые узлы предпочтительны при *геометризации* конвергентно-узловых фазовых структур.

Значительные углы сходимости лучей (от 20 до 120°) по направлению к узловой структуре, содержащей рудные тела зон Главной и Тундровой (рис. 1 А, В), наблюдаются только с востока, со стороны восхождения глубинного канала рудно-магматической системы (РМС). Для периферических зон, например рудной зоны Пунктирной (рудные тела 40, 42, 34), узловые фазовые структуры характеризуются более простой формой в виде лепестков или петель, которые имеют тенденционные повороты (рис. 1 С-1). При этом для них характерно отсутствие сколько-нибудь значительных углов схождения лучей конвергенции как с запада, так и с востока. Если размер петель небольшой (рис. 1 С-2), фазовое вращение узловых структур выявить не удастся. Исследованы пары химических элементов раннего, редкометалльного этапа минералообразования, которые имеют близкие кларки и сходны по химическим свойствам, но один проявляет металлические свойства в большей степени, чем другой, например, вольфрам и молибден (рис. 1 D-1) или висмут и сурьма (рис. 1 D-2). Такие элементы способны к взаимозамещениям, образуют собственные минералы, которые могут содержать примеси друг друга. В фазовых траекториях такие пары образуют отчетливые конвергентно-узловые структуры (рис. 1 D), в которых находятся рудные тела зон Главной и Тундровой. Интересно, что закручивание лепестков в узле противоположно направлению вращения лучей конвергенции. При этом рудные тела могут оказаться не в самих узлах, а на подходе к ним, в начале закручивания лучей в узел. Это значит, что на ранних этапах минералообразования конвергентно-узловые структуры только начинали формироваться.

Лучи конвергенции занимают безрудные области и разграничивают рудные зоны. Углы сходимости лучей с востока рудной зоны Главной, где господствовал восходящий вихрь РМС [4], значительно превышают углы сходимости лучей с запада. Этот дисбаланс, вероятно, и послужил причиной сложной вращательной динамики в конвергентно-узловых структурах рудных зон и создал в них динамические условия для рудоотложения.

2. Отображение динамики фазовых структур в геометрическом пространстве (в разрезе) месторождения производится с использованием *направлений приращения содержаний* в коррелирующихся экстремумах. Иллюстрация этого приема приведена на рис. 2 (см. также в работе [4]) для пары химических элементов Au-As. Точку приложения направлений определяем по положению экстремума на фазовой траектории и в спектре этой траектории вдоль горизонта (по спектрам и строились погоризонтные траектории). Стрелками обозначаем направление возрастания содержаний химического элемента от одной траектории к другой, судя по тому, вдоль какой оси растут значения коррелирующихся экстремумов — вдоль оси содержаний золота или вдоль оси содержаний мышьяка. В конвергентно-узловых структурах наиболее динамично изменяются внешние концы лучей конвергенции. Точка приложения направления возрастания содержаний находится на каждом луче в экстремуме, ближайшем к узлу. Например, на рис. 1 А-1 вдоль оси As происходит возрастание содержаний внешних концов лучей в направлении от траектории +100 м к траектории 0 м, затем к траектории –100 м, затем к траектории –200 м. Соответственно будем говорить о преобладании As-потоков на этом интервале глубин в направлении от верхних горизонтов к нижним. На спектрах в цифрах идут обозначения содержаний золота, в буквах — содержания мышьяка, снятые с изолиний этих элементов (рис. 2 D); индексы показаны на рис. 2 В в порядке возрастания содержаний. На рис. 2 В линия I направлений проходит через экстремумы на горизонте +100 м: через ячейку 12h, на горизонте 0 м через ячейку 13m, на горизонте –100 м — через ячейку 15g. Эта линия направлений I в фазовом пространстве (рис. 2 С) проходит через ту же последовательность ячеек 12h-13m-15g, т.е. мы производим фазово-геометрическое отображение. Линия направлений II возрастания содержаний в локальном экстремуме фазовой узловой структуры (рис. 2 С) находит свое отображение на спектрах в линии II, проходящей через ту же последовательность ячеек, что и в фазовом пространстве: 13s-13u-13y (рис. 2 В). Как видим, содержания золота (цифры) не меняются, содержания мышьяка (буквы) возрастают в направлении снизу вверх по разрезу.

В результате геометризации мы получили *картину направлений* приращения содержаний двух переменных золото-мышьяк, на основе которой выяснили, что главным структурно-динамическим элементом является *комплекс циркуляционно-вихревых потоков*. Осо-

ждения позволяют составить гипотетический сценарий его геохимического развития.

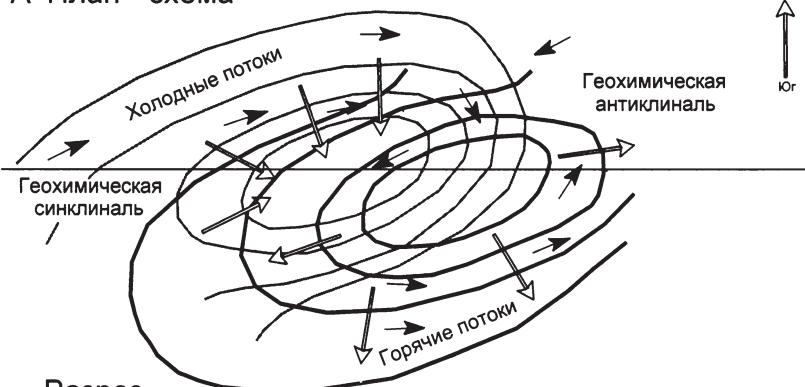
3-1. *Региональные предпосылки* формирования месторождения приведены в работе [4], по которой первоначальный импульс вращательной динамики связывается с внедрением Кукейского гранитоидного массива, находящегося в 8 км восточнее месторождения [1, 3]. Формирование интрузивно-купольной структуры массива, сопровождающееся поступлением из глубин магмы и флюидов, одновременно вызвало в окрестностях компенсационные *нисходящие потоки* и развитие отрицательных тектонических форм в виде наложенных пликативных и разрывно-дислокационных структур. Впоследствии они были осложнены локальными положительными формами и напряженной дизъюнктивной тектоникой месторождений. Предполагается, что именно на стадии нисходящих потоков формируется наибольшее количество разрывных нарушений разных направлений, усиливающих локальную проницаемость толщ. В таких местах нисходящие потоки (грунтовых, внутрипластовых, порово-капиллярных вод) могли сходиться с образованием *вихревой воронки*. Воронкообразная структура сохранилась в тренде содержащий элемент ранней, редкометаллической стадии минералообразования — вольфрама и молибдена (рис. 3). Для получения лучшего выражения этой геохимической структуры использован простой прием — *парные изоконцентрации* — состоящий в следующем. После наложения разреза изолиний (раздел Методика в [4, 6]) содержания вольфрама (интервалы между изолиниями обозначены цифрами в порядке возрастания значений) на разрез изолиний содержания молибдена (интервалы обозначены буквами) соединим полученные криволинейные ячейки с одинаковыми двойными индексами (цифра и буква). На рис. 3 В отчетливо видна вогнутая структура, «геохимическая синклираль», в линиях парных изоконцентраций W-Mo, имеющая размер на уровне эрозионного среза более 3,5 км, вертикальный размах не менее 1,5 км и максимальное углубление в области рудной зоны Главной.

В конце этапа нижняя часть вихревой воронки преобразовалась во вращающуюся суперячейку с аномально высокой обводненностью пород. Предрудный минеральный комплекс представлен рассеянной пиритовой и халькопирит-пирротиновой минерализацией, распространение которой,

очевидно, связано с геохимической синклиалью, при этом вероятен седиментационный эффект.

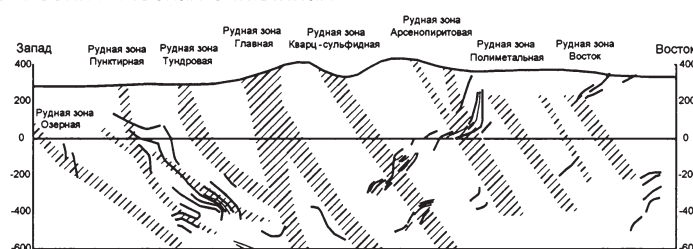
3-2. *Метаморфогенный этап* формирования месторождения подробно изложен в работе [4] по результа-

А План - схема

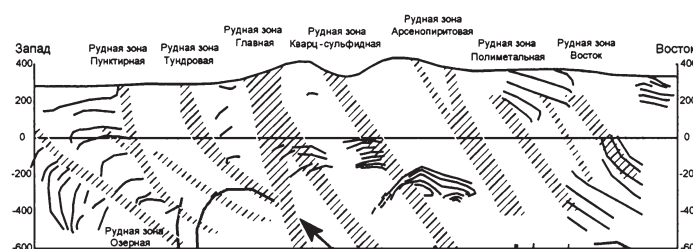


Разрез

В Геохимическая синклираль



С Геохимическая антиклираль



Тороидальный вихрь

Д Глубинная вихревая структура рудно-магматической системы

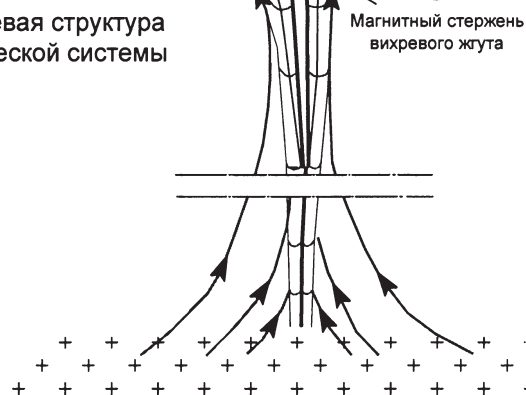


Рис. 3. Геохимические структуры на ранних этапах формирования месторождения и их связь с глубинным каналом рудно-магматической системы

там фазово-структурных исследований в системе электрических и магнитных характеристик пород. Сценарий этого этапа кратко заключается в преобразовании нисходящих потоков вихревой воронки после достижения высокоградиентного уровня в области очаговой структуры в восходящий вихрь, жгут которого определен геофизическими методами. Предполагается, что вихревым восходящим потоком транспортировалась остаточная магма из источника, питавшего Кукенейский гранитоидный массив, в результате чего на месторождении образовалось множество даек раннего и позднего этапа, а также эксплозивные брекчии. Восходящий вихревой поток выражен, как и вышеописанная нисходящая воронкообразная структура, в *парных изоконцентрациях* вольфрама и молибдена. На рис. 3 С показана «геохимическая антиклиналь», по размерам соизмеримая с суперячейкой. Наиболее отчетливо эта структура проявлена на флангах месторождения, в центральной части — в меньшей степени, что связано с обилием здесь локальных аномалий W и Mo рудогенной природы. Максимальный градиент геохимической купольной структуры наблюдается в области восстания глубинного канала РМС. На западном фланге месторождения наблюдается изгибание (и обрыв) линий парных изоконцентраций на рудных зонах, что свидетельствует о более раннем заложении зон смятия и дробления, которые служили каналами для гидротермальных растворов и стали рудовмещающими. Золотосульфидное оруденение накладывается на все типы магматических пород и эксплозивные брекчии [1, 3]. С позиций минералогической стадийности это была стадия метаморфогенного кварца (минеральная ассоциация раннего кварца), которой соответствует следующие химический и термодинамический режим: высокие концентрации CO_2 (60–95 %) при $T = 400\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$, давления $P = 1100\text{--}740$ атм. Отмечается незначительный вынос кремнекислоты, фосфора, а также органического углерода и привнесение оксидов железа, кальция, магния, углекислоты и сульфидной серы [1, 3].

3-3. *Продуктивный этап.* Дальнейшее развитие динамической системы месторождения как в физических [4], так и в геохимических характеристиках сопряжено с трансформированием суперячейки. Восходящий из глубин вихрь, проявившийся на ранних этапах метаморфизма, в транспортировке магмы и т.п., в дальнейшем стал причиной формирования рудоносных *циркуляционно-вихревых комплексов*. Специфика циркуляции потоков заключается в наличии или отсутствии признаков поступательного движения и, следовательно, существования вихря или его отсутствия. Для иллюстрации рассмотрим Западный блок месторождения в системе Au-As, который включает рудные зоны Главную (рудные тела 1, 3, 23, 31), Тундровую (24, 25), Пунктирную (34, 40, 42,) и частично Озерную (43). Далее изложены версии возможного функционирования рудоносных конвергентно-узловых/циркуляционно-вихревых структур.

1. *Однонаправленная циркуляция потоков* золота и мышьяка. Если потоки возрастания содержания мышьяка и золота в одном канале (в экстремуме, коррелирующемся от траектории к траектории) направлены в одну и ту же сторону, то они связаны с глубинной вихревой структурой РМС. Действительно, однонаправленная циркуляция потоков вдоль восточного края области лучей конвергенции, на восток от рудной зоны Главной (рис. 2 А), принадлежит глубинному вихрю на границе магнитных пород, слагающих его жгут (рис. 3 D), магнитный «стержень» которого распространяется на несколько километров в глубину [4]. Однонаправленной циркуляцией потоков золота и мышьяка обладает также вихревая структура I субгоризонтального тороидального вихря (в разрез попало его поперечное сечение), который является производным той же глубинной вихревой структуры РМС.

2. *Разнонаправленная циркуляция потоков* золота и мышьяка в одном канале (в коррелирующихся фазовых экстремумах) характерна для рудных зон. При этом потоки мышьяка направлены (в большинстве случаев в Западном блоке) вверх, а золота — вниз. Оставляя в стороне физику и химию процессов, проследим пространственные взаимоотношения циркуляции потоков, например, в блоке II-а рудной зоны Главной в интервале глубин $+100 \dots -100$ м (рис. 2 А, В). Потоки мышьяка с правой стороны блока II-а, поднимаясь вверх, накапливают его количество. Примечательно, что в этом же направлении растет электрохимическая активность пород [4]. Предполагается, что на верхней границе блока II-а тонкодисперсное золото, рассеянное в сульфидах, высвобождается, и по направлению вниз в циркуляционном потоке с левой стороны блока II-а происходит его накопление до нижней его границы. В данном случае содержания золота держатся на одном высоком уровне, скорость изменений равна нулю, а это по теории вихрей наблюдается на внешней границе вихря [2]. Предполагается также, что через некоторый пространственно-временной промежуток из тороидального вихря, функционально связанного с вертикальной вихревой структурой РМС, приходит вещественно-энергетический импульс для нового возрастания содержания мышьяка. Циркуляция возобновляется и, начиная с минимума, содержания мышьяка возрастают вверх по разрезу, а после достижения определенных максимальных значений на верхней границе блока II-а начинается высвобождение золота и его накопление в породах в потоке сверху вниз (или удерживание его на достаточно высоком уровне без изменения, если это край вихревой структуры). При этом размеры и форма блока, очевидно, могли изменяться в зависимости от вещественно-энергетического потенциала, приходящего опосредованно из глубин. Если потенциал велик, то циркуляции потоков вокруг блоков II-а, II-б, II-с, непосредственно примыкающих к тороидальному вихрю I, могли вовлекаться в левостороннее вращение в соответствии с ним. А если потенциал спадал, то в результате трения циркуляция могла затормаживаться и даже приобретать противоположное направление — правостороннее, и становиться вторичной по отноше-

нию к вихревым структурам глубинного происхождения. Так, если возрастание содержаний мышьяка снизу вверх по разрезу происходило в канале с левой стороны блока II-а, то золото увеличивало свои концентрации в потоке сверху вниз в канале на противоположном, правом ограничителе блока, повторяя цикл многократно. Если бы описываемые циркуляции потоков имели поступательную составляющую перпендикулярно плоскости чертежа, то это свидетельствовало бы о наличии вихревой структуры, имеющей жгут, протяженность которого могла варьировать и быть соизмеримой с горизонтальной протяженностью рудной зоны с севера на юг. Очевидно, что с изменением направления циркуляции, изменялось бы и направление потока в жгутах, течения в котором гораздо интенсивнее, чем вне его, так как внутри жгута понижены давление и температура. Это способствовало бы повышению концентрации гидротермальных растворов, их «всасыванию» в жгут. Такое вихревое вовлечение гидротермальных растворов с многократным изменением направления вихрей и соответственно потоков в вихревых жгутах могло происходить вдоль рудных зон на каждом этапе минералообразования, что и обеспечило накопление золота в минерализованных зонах смятия, дробления, находящихся в области действия этих вихрей, до промышленных концентраций. Этапы минералообразования, связанные с накоплением золота, включают в себя стадии золото-сульфидную и кварц-антимонитовую (с самородным мышьяком), минеральные ассоциации пирит-арсенопиритовую (условия рудообразования: 15–20 % NaCl, T = 320–280 °C, P = 640–170 атм), касситерит-пирит-арсенопирит-кварцевую (20 % NaCl, T = 335–200 °C, P = 200–180 атм) и кварц-антимонитовую с золотом (15–20 % NaCl, T = 280 °C, P = 170 атм) [1, 3].

Таким образом, фазово-структурный подход к геохимической информации, главным инструментом которого служат фазовые траектории в пространстве двух переменных, является наиболее адекватным сложности проблем, связанных с рудообразованием. Важный вывод из проведенного исследования состоит в том, что *геохимические критерии* оруденения имеют *неизбежно динамический характер и двойственную природу*. С одной стороны, критерием в пространстве содержаний химических элементов служит *конвергентно-узловой тип фазовых структур*, а с другой, в геометрическом пространстве — наличие комплекса *циркуляционно-вихревых* геохимических потоков, функционирование которых обеспечивало накопление полезного компонента, золота, в промышленных масштабах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков, А.В. Месторождение Майское / Многофакторные прогнозно-поисковые модели месторождений золота и серебра Северо-Востока России / А.В. Волков / Под ред. М.М. Константинова, И.С. Розенблюма, М.З. Зиннатуллина. — М.: Недра, 1992. — С. 79–84.
2. Жуковский, Н.Е. Теоретические основы воздухоплавания / Н.Е. Жуковский. — М.: Гостехиздат, 1925. — 308 с.
3. Константинов, М.М. Золоторудные гиганты России и мира / М.М. Константинов, Е.М. Некрасов, А.А. Сидоров, С.Ф. Стружков. — М.: Научный мир, 2000. — С. 28–36, 181.

4. Мезенцева, А.Е. Вращательная динамика золотосульфидного месторождения: фазово-структурный подход к петрофизике / А.Е. Мезенцева // Разведка и охрана недр. — 2016. — № 2. — С. 36–43.
5. Мезенцева, А.Е. Метод фазовых траекторий для прогноза золоторудных месторождений / Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований / А.Е. Мезенцева / Под ред. П.М. Горяинова, Г.М. Иванюка. — М.: Геос, 2001. — С. 146–158.
6. Мезенцева, А.Е. Фазово-структурный метод исследования числовых моделей рудных объектов с целью локального прогнозирования / А.Е. Мезенцева // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 1. — С. 7–14.

© Мезенцева А.Е., 2017

Мезенцева Антонина Евгеньевна // amezentseva@yandex.ru

УДК 553.041

**Корсаков А.К., Брюховецкий О.С., Межеловский А.Д.
(МГРИ-РГГРУ)**

СВЯЗЬ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ СО СТРУКТУРНО-ФОРМАЦИОННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ ЗЕЛЕНОКАМЕННЫХ ПОЯСОВ

*Рудоносность зеленокаменных поясов определяется составом, распространенностью и сохранностью рудовмещающих метаморфических структурно-формационных комплексов, а продуктивность последних — объемом и составом входящих в них рудоносных формаций. Месторождения полезных ископаемых занимают вполне определенное место в истории развития поясов и связаны с конкретными структурно-формационными комплексами. Качественный состав и интенсивность минерализации контролируются объемом и составом излившихся и внедрившихся магм, интенсивностью разрывной тектоники, скоростью погружения, глубиной морского бассейна и т.д. **Ключевые слова:** месторождения полезных ископаемых, ранний докембрий, зеленокаменные пояса, структурно-формационные комплексы.*

Korsakov A.K., Bryukhovetskiy O.S., Mezhelovskiy A.D.
(MGRI-RGGRU)

THE RELATIONSHIP OF MINERAL DEPOSITS WITH THE STRUCTURAL-FORMATIONAL COMPLEXES OF GREENSTONE BELTS

*Ore-bearing Greenstone belts are determined by the composition, abundance and preservation of ore-bearing metamorphic structural-formational complexes, and the productivity of the latter — the volume and composition of their constituent ore-bearing formations. Mineral deposits occupy a definite place in the history of the development of the belts and are associated with specific structural-formational complexes. The qualitative composition and intensity of mineralization are controlled by the volume and composition of effusive and intruded magmas, the intensity of the fault tectonics, speed of dive, depth of the sea basin and etc. **Keywords:** deposits of minerals, the Early-Pre-Cambrian, greenstone belts, structural-formational complexes.*