

Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет



НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

***ЛОМОНОСОВСКИЕ  
ЧТЕНИЯ***

***СЕКЦИЯ ГЕОЛОГИИ***

***Подсекция  
геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых***

Руководитель – зав. кафедрой, профессор Старостин В.И.

СБОРНИК  
ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Москва  
2026

## Содержание:

1. Основы квантовой геологии применительно к изучению минеральных ресурсов В.И.Старостин . . . . .	2
2. Конкуренция за критическое минеральное сырье в постглобалистский период А.Л. Дергачев . . . . .	4
3. Новые данные о датировке гидротермальных процессов на Весеннем и Джусинском колчеданных месторождениях (Южный Урал) Е. И. Ярцев, Е. А. Тихонова . . . . .	8
4. Тектоника и металлогения Центрально-Азиатского орогенного суперколлажа - новая интерпретация А.С. Якубчук . . . . .	10
5. Экзогенно-техногенные провинции твердых полезных ископаемых А.А. Самсонов . . . . .	11
6. Применение блочных моделей для геологического и структурного анализа месторождений А.А. Борисов, М.А. Богуславский . . . . .	13
7. Структура минерально-сырьевой базы висмута и теллура Китая Д.И. Вильданов, М.А. Богуславский, В.М. Петров . . . . .	16
8. Рациональное недропользование россыпных месторождений золота В.М. Петров, Д.И. Вильданов, Ю. А. Шевцова . . . . .	18
9. Особенности зональности скарнового оруденения месторождения Наседкино (Восточное Забайкалье) М.А. Богуславский, Д.М. Коршунов, М. А. Якушик . . . . .	23

ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ГЕОЛОГИИ  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИЗУЧЕНИЮ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

В.И. Старостин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет, Москва*

В настоящее время происходит смена парадигмы, началась новая научная революция, связанная,

- ✓ во-первых, с открытием многоядерных, безрадиационных и низкоэнергетических ядерных реакций: реакций холодного ядерного синтеза и реакций низкоэнергетической трансмутации химических элементов. Реакции низкоэнергетической трансмутации – это реакции превращение одних химических элементов в другие химические элементы в слабовозбужденных конденсированных средах;
- ✓ во-вторых, с открытием нового состояния атомной и ядерной материи: спинового нуклидного электронного конденсата
- ✓ в-третьих, с открытием нового, фундаментального резонансного интерференционного обменного взаимодействия (РИО-взаимодействие).

Для перехода к новой парадигме необходимо осознать, что в конденсированных средах, в сильных магнитных полях, более 30 Тл, ядерные реакции происходят при низких энергиях (в объеме реакций < 10 эВ/атом), и они осуществляются повсеместно во Вселенной

Низкоэнергетические ядерные реакции (НЭЯР) были обнаружены и, в дальнейшем, воспроизведены при электролизе, происходящем в тяжелой воде; в тлеющем газовом разряде; при электронной плавке слитков циркония; при взрывах металлических мишеней, облучаемых мощным импульсом электронов; при взрывах в жидких диэлектрических средах металлических фольг, через которые пропусклся мощный импульс электрического тока; при воздействии импульсным током на расплав свинца с медью; при прохождении электрического тока в водно-минеральных средах; при ультразвуковой обработке водных солевых растворов; при облучении тормозными гамма квантами конденсированных газов; в растущих биологических структурах, и во многих других. Из приведенного перечня становится очевидным, что методики проводимых экспериментов по НЭЯР крайне разнообразны и в корне отличаются от методов ядерной физики. Несмотря на разнообразие методик, результаты экспериментов по НЭЯР качественно похожи друг на друга.

Условия, при которых образуются сильные магнитные поля, ортобозоны и “капсулы”, значительно мягче, чем условия для термоядерных процессов. Следовательно, в магнитных слоях Солнца и звезд, благодаря образованию ортобозонов, могут протекать безкулоновские ядерные реакции, в первую очередь реакция:  $p + p + 2e^- \rightarrow d + \nu_e + e^- + 1.44 \text{ МэВ}$ , а не реакция  $p +$

$p \rightarrow d + \nu_e + e^+ + 0.42 \text{ МэВ}$ . Поэтому, звезды и Солнце могут быть, не только термоядерными реакторами.

Очевидно, чтобы получать химические элементы, совсем не обязательно взрывать сверхновые звезды. Таким образом, нуклеосинтез также может происходить благодаря реакциям низкоэнергетической трансмутации. Следовательно, нуклеосинтез может протекать как в звездах, так и на планетах.

# КОНКУРЕНЦИЯ ЗА КРИТИЧЕСКОЕ МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ В ПОСТГЛОБАЛИСТСКИЙ ПЕРИОД

А.Л. Дергачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет, Москва*

В конце XX – первой четверти XXI века предметом конкуренции и причиной геополитической напряженности стали многие важные виды твердых полезных ископаемых. Обострение сверх обычной конкуренции за минеральные ресурсы вызвано ростом населения и спроса на ресурсы недр, истощением фонда легкодоступных месторождений и ухудшением в среднем качества добываемого минерального сырья.

На этом фоне появляются новые области использования минеральных материалов, некоторые из которых в природе встречаются очень редко, в ряде случаев рассеяны и не образуют собственных месторождений, трудно извлекаются из руд других металлов, а требуемые свойства приобретают после чрезвычайно высокой степени технически сложной очистки. Их потребление на душу населения быстро возрастает благодаря их уникальным свойствам, востребованным в самых передовых, в том числе экологически чистых технологиях. Такие ресурсы правительствами многих высокоразвитых стран рассматриваются как критически важные.

Критическое минеральное сырье (КМС) имеет исключительно важное значение для экономики, обороноспособности и безопасности стран. Оно играет важнейшую роль в производстве самых передовых образцов техники и систем вооружений, в развитии информационных технологий следующего поколения, в том числе технологий больших данных и искусственного интеллекта, новых энергетических технологий, а также в получении новых материалов. Зачастую КМС не может быть заменено другими видами минерального сырья, и в отношении его существуют высокие риски перебоев в поставках из-за дефицита ресурсов или по иным, в том числе по геополитическим причинам. Важным конкурентным преимуществом для промышленно развитых стран является наличие источников КМС на их национальных территориях, а высокая зависимость от импорта КМС большинством стран рассматривается в качестве фактора риска для их экономического процветания и технологического лидерства.

Наибольшую потребность в критических материалах испытывают самые развитые в технологическом отношении страны, позиционирующие себя лидерами научно-технического прогресса. В силу разных причин США обладают высочайшим инновационным потенциалом, сохранение которого на фоне острой конкуренции с Китаем рассматривается в качестве первоочередной задачи государства. В связи с этим для дальнейшего анализа выбраны два

крупнейших в мире потребителя минеральных материалов и главные участники мировой гонки за критическим минеральным сырьем – американская и китайская экономики.

На территориях США и Китая сосредоточены (%) свыше 62 мировых запасов Mo, 52 РЗЭ и W, 20–30 V, Sb, Pb, Ti, Zn, Sn, графита и флюорита, более 15 Mn. Две крупнейшие экономики мира суммарно потребляют от 28–30 (бокситы, Pb) до 95–99 (Li, Sb, W) мирового производства критического минерального сырья, а намного меньшее потребление его в США отражает особенности структуры ВВП страны, до 70% которого создается в сфере услуг.

В настоящее время ни одна крупная промышленно развитая страна не может быть на 100% обеспечена всеми видами критического минерального сырья за счет собственных ресурсов недр. Однако китайская экономика на 100% удовлетворяет внутренний спрос на 14 видов критического сырья, в том числе Ga, Ge, Mg (металл), Te, V, In, As, РЗЭ, Si, Y, Sc, графит, барит, фосфатные породы, а зависимость от нетто-импорта (NIR - net import reliance) превышает 80% лишь для Pt, Pd, Ni, Mn, Ta, Cu и достигает 100% только в отношении Nb, Rh, Cr. Для сравнения, в США, где критическими признаны 60 видов минерального сырья, кажущееся потребление обеспечено внутренней рудничной добычей на 100% лишь в отношении Mo, Fe, Be, РЗЭ (концентратов) и боратов, в то время как NIR для Te, Re, Li, Cu, Si, фосфатных пород и циркона изменяется от 40 до 80%, а по 29 видам критического минерального сырья, в том числе Ga, Ge, Nb, Bi, Ni, W, Cr, Mn, V, МПГ, Ta, Y, Sc, графиту достигает 90–100%.

Большее значение NIR означает более высокие риски прерывания поставок для экономики США, которые усугубляются высокой концентрацией мирового рудничного и металлургического производства, импортируемого КМС. Анализ показывает, что производство очищенных металлов и их соединений, как правило, сконцентрировано сильнее, чем их рудничная добыча. Из 31 вида минеральной продукции, от импорта которой США зависят более чем на 50%, 15 представляют собой очищенные металлы и их соединения. Из них лишь для Zn, Sn и Ti индекс Херфендаля-Хиршмана (НИ) не превышает 3000, а для In, Ga, Ge, As, Sb, Te, Mg, РЗЭ, Bi, Co, Li, V, W, Re, Nb, а также для природного графита и флюорита он изменяется от 3876 для As до необычайно высокого 9667 для Ga.

Для 17 последних видов минеральных материалов характерны и очень высокие индексы Линда (IL). Лишь для As, V, Ti этот показатель не превышает 700. Опыт расчетов показывает, что наиболее высокие значения индекса Линда ( $IL > 700$ ) типичны для КМС, в мировом производстве которых доля страны-лидера превышает 57–71%, что в 4–11 раз больше, чем у страны со вторым рейтингом. Учитывая, что на рынке минерального сырья важнейшие импортеры стремятся иметь дело с крупными производителями, это означает, что при импорте КМС круг потенциальных поставщиков для США зачастую ограничивается, если не

монополистом, то страной с большим отрывом лидирующей в производстве КМС. По многим его видам таким основным поставщиком и лидером мирового рейтинга производителей является главный экономический и геополитический соперник США. Риски зависимости от импорта КМС из Китая осознаются в США. С 2009–2012 по 2020–2023 гг. сократилась доля китайского сырья в импорте Sb, Co, Ga, In, Mg (мет.), PЗЭ, Te, Ti (губка), W, V, флюорита, барита, графита. Во внешней торговле происходит переориентация на импорт КМС из стран-партнеров (прежде всего из Канады, Мексики, Австралии). Американские компании проводят активные, но не слишком успешные работы по поиску новых месторождений КМС в третьих странах и расконсервируют заброшенные месторождения на своей территории. Однако и в настоящее время Китай занимает первое место среди поставщиков в США Y (93% американского импорта), Zr (88), соединений PЗЭ (70), Bi (67) Sb (63), As (52), Ge (51), графита (43), W (27), Ta (22), Hf (21) и второе место по поставкам барита (25) и Ga (19).

Высокая степень зависимости от внешних поставок и связанные с этим высокие риски в развитии высокотехнологичных отраслей, а также нынешнее состояние минерально-сырьевой базы и в целом горно-металлургического комплекса США заставляют усомниться в достижимости целей реиндустриализации этой страны и завоевания технологического лидерства, курс на которые провозглашен ее руководством.

В отличие от этого китайская экономика ориентирована на обеспечение внутренних потребностей за счет национальных ресурсов недр. В стране разведана значительная часть мировых запасов многих видов КМС, а темпы отработки запасов (отношение запасов к годовой рудничной добыче, %) в Китае значительно превышают среднемировые. Не имея возможности в силу естественных причин лидировать в мире по запасам того или иного вида КМС, Китай предпочитает закупать по всему миру рудничную продукцию (например, концентраты металлов), сосредоточивая производство продуктов их переработки (например, очищенные металлы и их соединения) на национальной территории, обеспечивая стране лидерство в производстве продукции более высоких переделов и с более высокой добавленной стоимостью. Так, доля страны в мировых запасах Co составляет (%)  $n \times 0,1$ , в рудничной добыче металла – 1,3, а в производстве очищенного металла и его соединений – 81,8. Такая стратегия используется даже в отношении тех видов КМС, запасы которых в Китае весьма значительны (Li, W, Pb, Zn, Sn, и даже PЗЭ, в том числе импортируемые из США).

Ориентировка на ввоз из-за рубежа рудничной продукции, рынок которой менее концентрирован, чем производство очищенных металлов и их соединений, обеспечивает Китаю большие возможности для диверсификации импорта. В закупках КМС за рубежом Китай ориентирован на своих политических союзников, членов БРИКС и других общих с ним региональных международных объединений: Бразилию (руды Fe, Nb), ЮАР (Mn, Cr, МПГ, Ni и

др.), Индонезию, а также дружественные страны с большой рудничной добычей КМС, в частности, ДРК (Ta, Co, Cu), Чили (Cu, Li), Перу (Cu) и др.

Выбранный курс позволяет Китаю полностью удовлетворять потребности национальной экономики в конечной продукции по большинству видов КМС, сохранять позицию их крупнейшего мирового поставщика даже при незначительных ресурсах недр, а также укреплять свои позиции в мире за счет повышения концентрации производства КМС. Таким образом, эта страна обеспечивает наименьшие риски поставок КМС для оборонного сектора и высокотехнологичных отраслей национальной экономики и преимущество в борьбе за мировое технологическое лидерство и экономическое процветание. Используя свое доминирующее положение на рынке многих видов КМС Китай получает возможность регулировать их поставки на мировой рынок через введение ограничений на экспорт, квоты на добычу и др. меры, и в конечном счете влиять на успешность реализации крупнейших проектов в странах-конкурентах.

# НОВЫЕ ДАННЫЕ О ДАТИРОВКЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВЕСЕННЕМ И ДЖУСИНСКОМ КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Е. И. Ярцев<sup>1</sup>, Е.А.Тихонова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет, Москва*

Джусинское колчеданно-полиметаллическое и Весеннее колчеданное месторождения расположены в Оренбургской области: Джусинское месторождение — в Адамовском районе, Весеннее — в Домбаровском.

Объект Джусинский представляет собой крутопадающие линзовидные и столбообразные сульфидные залежи среди вулканогенно-осадочных толщ среднего девона, пронизанных разновозрастными дайками основного и среднего состава. Руды преимущественно пирит-халькопирит-сфалеритового состава с галенитом. Возраст оруденения тяготеет к границе между эйфелем и живетом (Ярцев, Еремин, Викентьев, 2017). Подрудная толща месторождения сложена кварц-серицитовыми метасоматитами с реликтами подводящих каналов в виде пиритовой минерализации и серноколчеданных тел. Ar-Ar датирование пробы мусковита (90,02 мг) из подрудных метасоматитов показало интегральный возраст =  $353 \pm 5$  млн. лет. Возраст тяготеет к границе фаменского яруса верхнего девона с турнейским ярусом нижнего карбона и свидетельствует о реактивации гидротермальной деятельности и, вероятно, является отражением более поздних процессов (гиперколлизии).

Объект Весенний представляет собой участок Весенне-Аралчинского колчеданного месторождения, располагающийся на территории Российской Федерации (участок Аралчинский находится на территории Республики Казахстан). В геологическом отношении участок Весенний представляет собой линзовидную рудную залежь, пространственно приуроченную к контакту Кошенсайского гранитного массива и ороговикованных базитов (Решетникова, Ярцев, Тверитинова, 2021). На объекте также присутствуют разновозрастные дайки базитов и субвулканических риолит-порфиров. Руды, в основном, пирит-халькопиритового состава со сфалеритом. Ar-Ar методом продатирована проба мусковита (51,22 мг) из полевошпат-мусковитовой жилы с молибденитом вблизи дайки риолит-порфиров, секущей граниты Кошенсайского массива. Интегральный возраст пробы определен как  $392,8 \pm 4,7$  млн лет, что противоречит известным на данный момент данным о датировке возраста Кошенсайского массива. По данным Лядского и др., (2013), надежные определения радиоизотопного возраста пород отсутствуют. Калий-аргоновый метод по «валу» (ЦХЛ ПГО «Уралгеология») дал для Кошенсайского массива — 269–359 млн. лет (Лисов и др., 2002). Полученные противоречия обосновывают целесообразность проведения дополнительных исследований по абсолютной датировке Кошенсайского массива.

Оба месторождения являются метаморфизованными. Ключевым фактором метаморфизма Джусинского месторождения является динамометаморфизм, Весеннего — контактовый.

### Литература

*Ярцев Е. И., Еремин Н. И., Викентьев И. В.* Субвулканические габбро-порфириды, интрузивные диориты и колчеданное оруденение Джусинского месторождения (Южный Урал) // *Доклады Академии наук.* — 2017. — Т. 476, № 2. — С. 197–199.

*Решетникова О. И., Ярцев Е. И., Тверитинова Т. Ю.* Этапы формирования и новейшие поля напряжений Весенне-Аралчинского колчеданного месторождения (Южный Урал) // *Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы седьмой молодежной тектонофизической школы-семинара / Под ред. Н. А. Гордеев.* — М.: ИФЗ РАН, 2021. — С. 155–160.

*Лядский П. В., Кваснюк Л. Н., Жданов А. В., Чечулина О. В. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист М40 (Оренбург) с клапаном М41. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. 392 с. + 1 вкл.

*Лисов А. С., Абрамович В. В., Алексеева Г. А. и др.* Материалы к Государственной геологической карте РФ масштаба 1 : 200 000 листа М-40-ХII (Ясный), М-40-ХVIII (сев. часть). Отчет Кумакского отряда Теренсайской партии по результатам ГДП-200 за 1995–2001 гг. Т. 1 и 2. ФГУ «ГФИ по Приволжскому ФО», Оренбургский филиал. 2002.

# ТЕКТОНИКА И МЕТАЛЛОГЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО ОРОГЕННОГО СУПЕРКОЛЛАЖА – НОВАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

А.С. Якубчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет, Москва*

Тектоника Центрально-Азиатского орогенного суперколлажа рассматривается в совокупности с Сибирским и Сино-Туранским кратонами. Последняя группа простирается на 12 000 км от Алай-Тарима до Индокитая. Внутри суперколлажа ей соответствуют Исседонские и Тувино-Монгольские кратонные террейны, изогнутые в Казахстанский и Монгольский ороклины и располагающийся между ними предлагаемый мной Иртышский ороклин. «Разгибание» ороклинов в сочетании с Сино-Тураном восстанавливает всего одну, но очень длинную Транс-Азиатскую тектоническую ось длиной 18 500 км, которая, с одной стороны, была мостом между Сибирью и Австралией, а, с другой, разделяла аккреционные и островодужные террейны, которые росли симметрично в сторону Палеотихого и Палеоазиатского океанов, включая эквиваленты последнего в Палеотетисе.

Предлагается, что во время распада Родинии при раскрытии Тихого океана около 720 млн лет назад Транс-Азиатские кратонные террейны и кратоны отделились от Западной Лаврентии вместе с Сибирью и Австралией по такому же принципу как Северная Америка, Южная Америка и Антарктида от Пангеи во время мезозойского раскрытия Атлантического океана. Ороклинное изгибание Транс-Азиатской кратонной оси прогрессировало постепенно после прорастания с конца раннего палеозоя Палеоазиатского/ Палеотетического центров спрединга в направлении Тихого океана и дрейфа Транс-Азиатской кратонных террейнов в направлении Сибирского и Восточно-Европейского кратонов. Эти направленные движения в итоге вызвали раскрытие междуговых бассейнов между кратонными террейнами оси и ювенильными магматическими дугами, их коллизионное закрытие и пульсационное изгибание в ороклины в течение 350 млн лет, с полной консолидацией Центрально-Азиатского суперколлажа после коллизии вдоль Монголо-Охотской сутуры в середине мелового периода.

В металлогеническом плане такая тектоническая эволюция Восточной Азии определила двунаправленное наращивание континентальной коры с двунаправленной миграцией магматических дуг на фоне периодически повторяющейся смены субдукционных обстановок на коллизионные. При этом современные геохронологические данные показывают неоднократное пульсационное формирование золота как в качестве попутного продукта в надсубдукционных колчеданных и медно-порфировых системах, так и как основного металла в золоторудных орогенных и гранитоидных месторождениях.

# ЭКЗОГЕННО-ТЕХНОГЕННЫЕ ПРОВИНЦИИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

А.А. Самсонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет, Москва*

Твёрдые полезные ископаемые техногенных образований рассматриваются не только как отходы недропользования, а как особый тип приповерхностных геологических тел, обладающих собственными закономерностями состава, строения и посттехнологического развития. Ранее было показано, что корректное изучение техногенных образований требует введения понятия антропогенного литогенеза, то есть закономерное преобразование техногенного вещества после его накопления на дневной поверхности [1]. Следующий этап исследования смещает акцент с внутренней классификации техногенных тел на пространственный уровень анализа. Основная задача состоит в определении закономерностей распределения по территории России крупных техногенных объектов, вариантов их сочетания в разных горнопромышленных районах и рассмотрении таких районов как самостоятельных экзогенно-техногенные металлогенических провинций.

Эмпирической основой исследования служит база данных «Интерактивная карта техногенных объектов» ФГБУ «Институт Карпинского», включающая более двух тысяч объектов [2]. Для целей пространственного сопоставления был выполнен отбор объектов по ряду критериев: в выборку включались прежде всего хвостохранилища, а в отдельных случаях – крупные шлаковые отвалы и отходы золотоизвлекательных фабрик. Дополнительными критериями выступали значительный накопленный объём, а также наличие сведений о полезных компонентах хотя бы на качественном уровне. В результате была сформирована репрезентативная выборка из 155 объектов, охватывающая основные горнопромышленные районы страны. Классификация строится не только по происхождению исходной руды, но и по минералого-технологическому облику техногенного вещества, а также по траектории его гипергенного преобразования.

В работе уточнена иерархическая минералого-технологическая классификация техногенных образований. Помимо ранее выделенных групп высокосульфидных, смешанных, низкосульфидных и редкометалльных хвостов [1], в систему включены хвосты цианирования и отходы металлургического передела. Существенным дополнением выступает временной критерий состояния объекта – от свежих до старых техногенных тел, поскольку именно возраст во многих случаях отражает глубину гипергенной переработки вещества, степень развития зон окисления, вторичной минерализации и потенциальную экологическую опасность. Пространственный анализ показал, что техногенные объекты на территории России

распределены не хаотично, а образуют устойчивые кластеры, связанные с исторически сложившимися горнопромышленными районами. На этом основании выделено восемь экзогенно-техногенных металлогенических провинций: Уральская, Кольская, Курская, Норильская, Забайкальская, Приморская, Северо-Восточная и Северо-Кавказская, которые характеризуются сочетанием сырьевой специализации, возрастной структуры техногенных тел, гипергенного поведения вещества и экологических рисков. Такой подход позволяет перейти от изучения отдельных объектов к региональной типизации техногенных геологических систем. Его практическое значение состоит в возможности выбирать опорные объекты внутри каждой провинции, отрабатывать на них схемы минералого-геохимического анализа, мониторинга и переработки, а затем масштабировать полученные решения на сходные по типу техногенные тела.

Проведённое исследование показывает, что твёрдые полезные ископаемые техногенных образований целесообразно рассматривать одновременно в двух взаимосвязанных направлениях исследования: внутреннем, где решающим является минералого-технологический тип и стадия антропогенного литогенеза, и пространственном, где определяющее значение приобретает принадлежность объекта к той или иной экзогенно-техногенной металлогенической провинции. Выделение восьми провинций России подтверждает наследование техногенной металлогенией природных рудных систем, но в существенно переработанном технологическими и гипергенными процессами виде. Такой подход создаёт основу для более точной геолого-экономической оценки техногенного сырья, для ранжирования экологических рисков и для разработки региональных стратегий освоения наиболее перспективных техногенных объектов.

### **Литература**

*Самсонов А.А., Кориунов Д.М., Старостин В.И.* Проблемы изучения и классификации твёрдых полезных ископаемых техногенных образований // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2026. № 1. С. 144-152.

ФГБУ «Институт Карпинского». Интерактивная карта техногенных объектов основных видов рудных и нерудных полезных ископаемых Российской Федерации. База данных техногенных объектов горной отрасли Российской Федерации. [Электронный ресурс].

# ПРИМЕНЕНИЕ БЛОЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО И СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А.А. Борисов<sup>1</sup>, М.А. Богуславский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет, Москва*

Блочное моделирование – наиболее распространенный в настоящее время метод подсчета запасов. Блочная модель представляет из себя объем недр, разделенный на ячейки или блоки равного размера. В ячейки блочной модели присваиваются содержания полезных компонентов и любые другие числовые характеристики, определенные по данным опробования разведочных выработок. Интерполяция содержаний в блоки модели основана на геостатистических исследованиях.

Спектр применения блочных моделей широкий: утверждение запасов в ФБУ «ГКЗ» [1], оценка ресурсов по классификации JORC [2], основа для оптимизации оптимальной оболочки карьера, контроль содержаний при эксплуатации, оценка устойчивости массива (геомеханические модели).

Высокая детальность сведений о недрах представляет наибольший интерес в блочных моделях. Данные о распределении металлов, получаемые при блочном моделировании, могут быть использованы не только для оценки запасов, но и для геологического и структурного анализа строения рудных месторождений твердых полезных ископаемых.

Предлагаемая методика в целом соответствует обычному подходу при оценке запасов месторождения: статистический и геостатистический анализ, предшествующий процедурам блочного моделирования. Ключевое отличие методики в том, что интерполяция содержаний осуществляется строго в пределах корреляции, определенных по вариограммам.

Это обусловлено тем, что для оценки геологических и структурных факторов размещения оруденения необходимы наиболее достоверные сведения о распределении полезных компонентов в пространстве. С позиций геостатистики обоснованная интерполяция может осуществляться исключительно в пределах зоны предела корреляции на полувариограммах, что и обеспечивает надежность получаемых результатов. Методика применима только в случаях, когда вариограммный анализ позволяет определить предел корреляции. Если экспериментальная полувариограмма не выходит на плато (то есть предел корреляции по какому-либо направлению не определяется), использование метода становится невозможным.

Основные направления изменчивости определяются по картам вариограмм. На карте определяется наиболее выдержанное направление главной оси – простираения минерализации, второй оси – падения рудных тел, и третьей оси наименьшей выдержанности – мощности. По каждому направлению строится экспериментальная модель, которая аппроксимируется теоретической функцией. По вариограмме определяется предел корреляции (выход на плато), и

дальнейшая интерполяция содержаний производится строго в выявленном интервале корреляции.

Результаты оценки содержаний металлов в блочной модели отображаются с помощью цветовой шкалы, что обеспечивает наглядное представление пространственного распределения. При визуальном анализе распределения металлов в блочной модели отмечаются определенные закономерности.

Практическая реализация методики детально проиллюстрирована на примере Буруктальского месторождения.

Изменчивость, наблюдаемая в распределении содержаний модели обусловлена в первую очередь геометрией разведочной сети. Участки с богатым или бедным содержанием в первую очередь ориентируются согласно ориентировке буровых скважин. Для Буруктальского месторождения — это направление по разведочным профилям (азимут 140) и вкрест них (азимут 50), соответствующее простиранию коры выветривания. Но, кроме этих направлений, также выделяются отдельные участки линейного распространения высоких содержаний никеля в субмеридиональном направлении (рис. 1).

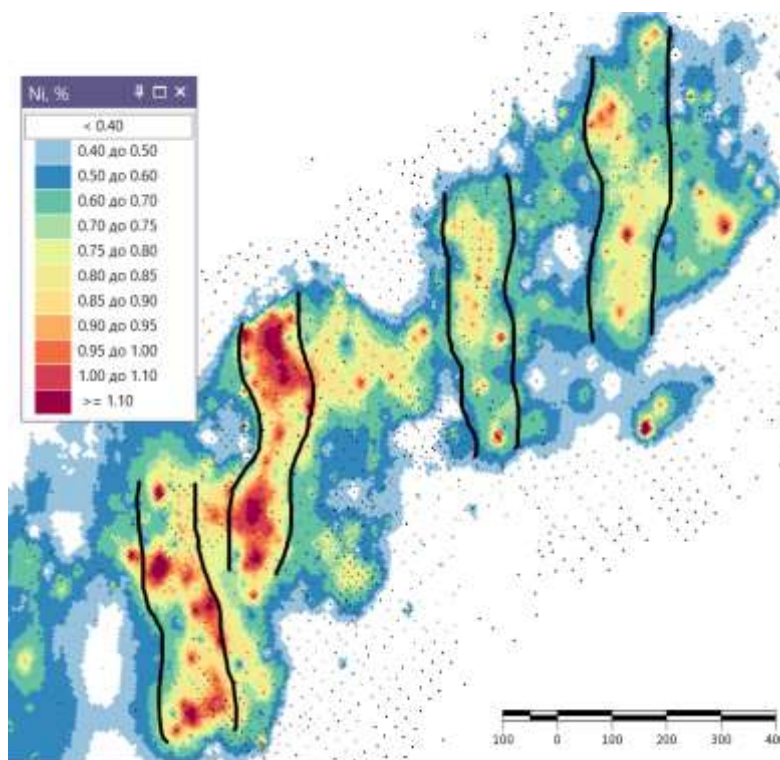


Рис. 1. Распределение содержаний никеля в блочной модели.

Анализ пространственного распределения никеля показывает неравномерную локализацию обогащённых участков. Основное простирание рудоносной коры выветривания ориентировано по азимуту 50°, что соответствует перпендикулярному направлению относительно разведочных линий. Параллельно выделяется дополнительный тренд

минерализации в интервале азимутов 350-10°, выраженный линейными зонами аномально высоких содержаний металла.

Особенности распределения никеля обусловлены линейно-площадным характером Буруктальской коры выветривания [3]. Интерпретация позволяет предположить, что выявленные линейные структуры соответствуют либо разломным зонам, способствовавшим интенсивному окислению серпентинитов на глубину с сопутствующим высвобождением никеля, либо дайкам, сформировавшим хлоритовые руды эндогенного типа в результате метасоматического преобразования ультраосновного массива жильными интрузивами. Оба процесса могли оказывать существенное влияние на перераспределение никеля в коре выветривания.

Практическая значимость выявленной закономерности заключается в возможности оптимизации геологоразведочных работ за счет адаптации конфигурации разведочной сети к установленным направлениям минерализации, т. е. применение ячейки разведочной сети с азимутом 0-90°. Участки на продолжении выявленных линейных зон с повышенными содержаниями следует считать приоритетными для продолжения геологоразведочных работ.

### **Литература**

Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. ФБУ «ГКЗ», М., 2007

JORC. 2012. Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code). Издание 2012 года. The Joint Ore Reserves Committee.

*Борисов А. А., Богуславский М. А.* Факторы формирования Буруктальского месторождения силикатного никеля // Вестник МГУ, серия геология. 2025

## СТРУКТУРА МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ВИСМУТА И ТЕЛЛУРА КИТАЯ

Д.И. Вильданов<sup>1</sup>, М.А. Богуславский<sup>1</sup>, В.М. Петров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет, Москва*

Висмут находит применение в самых разных областях. В металлургии он используется для производства легкоплавких сплавов, улучшения обрабатываемости алюминиевых и стальных сплавов. В медицине и фармацевтике препараты висмута применяются преимущественно в гастроэнтерологии как одна из ключевых терапий *Helicobacter Pylori*. В электронике висмут используется при производстве датчиков Холла и термоэлектрических устройств. Благодаря низкой токсичности висмут становится основой экологически безопасных сплавов как замена. Он также востребован в ядерной энергетике в качестве жидкого теплоносителя и охлаждающего агента в реакторах (сплав свинец-висмут), а также в оборонной и аэрокосмической промышленности.

Теллур также имеет широкий спектр использования. Он применяется для легирования металлов (в частности, как добавка к меди, свинцу и сталям), в электронике при создании фазовой памяти (PCM), в термоэлектрике в составе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и его сплавов. В инфракрасной оптике теллур используется в составе  $\text{CdZnTe}$  при производстве детекторов для медицинской визуализации (включая томографию). Однако, наиболее важным и быстрорастущим применением теллура в контексте энергетического перехода является солнечная фотовольтаика. Тонкоплёночные солнечные панели на основе теллурида кадмия ( $\text{CdTe}$ ) требуют 6,5 грамма теллура на 1 м<sup>2</sup> площади панели, что делает теллур критически важным материалом для развития этого сектора [1]. Кроме того, теллур востребован в металлургии в качестве добавки к сплавам и в нефтепромышленности как компонент катализаторов.

Китай является одним из ключевых игроков на рынке висмута и теллура. Основные источники этих металлов в Китае можно разделить на несколько типов месторождений. Месторождение Шичжюань даёт более 1500 тонн висмута в концентратах ежегодно, при содержании висмута около 20-30 процентов, что составляет примерно 300-450 тонн в год. Месторождение Дашуйгоу представляет собой уникальное теллур-висмутовое месторождение - единственное в мире, где эти металлы добываются в качестве основных продуктов. В данный момент оно находится в резерве страны из-за сложной переработки руд. Кроме того, значительные объёмы теллура и висмута извлекаются попутно из золоторудных месторождений, например, Янчжайюй, где по имеющимся данным содержание теллура достигает около 20 граммов на тонну. При этом ключевую роль в добыче висмута и теллура играют комплексные полиметаллические месторождения, где они как вторичные полезные компоненты. Ключевым аспектом успешности Китая в производстве висмута и теллура (75-80%

мирового производства) является в первую очередь комплексное извлечение всех полезных элементов из руд полиметаллических месторождений.

Россия обладает определенным потенциалом для развития добычи висмута и теллура, особенно в качестве попутных компонентов при переработке комплексных руд. Одним из ярких примеров является Юбилейное месторождение на Южном Урале. В разных типах руд этого месторождения содержание висмута достигает 14,5 грамма на тонну, а теллура варьируется от 1 до 200 граммов на тонну, составляя в среднем 20 граммов на тонну [2].

На месторождении Наседкино, разрабатываемом УГМК на Урале, по предварительным данным исследований, в разных типах руд содержание висмута достигает 500 граммов на тонну (минеральные формы - висмутин, козалит, тетрадимит), а теллура - до 100 граммов на тонну (калаверит, тетрадимит). В денежном выражении стоимость этих попутных компонентов составляет до 800 [3] и 8000 [4] рублей на тонну соответственно, что делает перспективным дальнейшее изучение данной минерализации на месторождении и исследование потенциальных технологий попутного извлечения висмута и теллура при переработке таких руд. В случае, если подобное извлечение технически возможно и экономически целесообразно, золоторудные месторождения могут стать дополнительными источниками висмута и теллура для России за счет увеличения полноты отработки таких объектов.

### Литература

1. Дергачев А.Л., Шемякина Е.М. Критическое минеральное сырье для малоуглеродной энергетики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 3. С. 3-10.
2. Целуйко А.С., Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П., Данюшевский Л.В. Теллуридная минерализация в обломочных рудах медноколчеданного месторождения Юбилейное (Южный Урал) // Геология рудных месторождений. - 2019. - Т. 61. - № 2. - С. 39-71.
3. Trading Economics. Tellurium - 2026 Data - Historical - 2027 Forecast [Электронный ресурс]. URL: <https://tradingeconomics.com/commodity/tellurium> (дата обращения: 15.04.2026).
4. Trading Economics. Bismuth - 2026 Data - Historical - 2027 Forecast [Электронный ресурс]. URL: <https://tradingeconomics.com/commodity/bismuth> (дата обращения: 15.04.2026).

## РАЦИОНАЛЬНОЕ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

В.М. Петров<sup>1</sup>, Д.И. Вильданов<sup>1</sup>, Ю. А. Шевцова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет, Москва

В современной практике недропользования Российской Федерации ключевым инструментом оценки целесообразности освоения месторождений полезных ископаемых являются кондиции. Для россыпных месторождений, имеющих сходные географо-экономические условия и однотипные геологические особенности, допускается применение районных кондиций. Данный подход регламентирован Распоряжением МПР России от 05.06.2007 №37-р «Об утверждении методических рекомендаций по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых» [1].

Районные кондиции — это условно стандартизированные промышленные требования к качеству сырья и горно-геологическим параметрам, разработанные для быстрой оценки группы однотипных мелких месторождений в регионе, имеющих сходные географо-экономические условия, однотипные геологические, горнотехнические и технологические возможности отработки [1, 2]. Формально районные кондиции имеют статус постоянных разведочных и позволяют ускорить процедуру оценки без выполнения индивидуального технико-экономического обоснования (ТЭО) для каждого объекта [1, 3]. Однако на практике их применение нередко вступает в противоречие с результатами расчетов, выполненных опытными специалистами на основе детальных локальных данных.

В Магаданской области региональные кондиции утверждены для россыпных месторождений золота и применяются к объектам с запасами, не превышающими величины, обоснованные геолого-статистическим анализом региона.

Площадь Магаданской области составляет 462 464 км<sup>2</sup> [4], и унификация требований для столь обширной территории неизбежно приводит к усреднению параметров кондиций, что может искажать реальную экономическую ценность конкретных локальных объектов.

Основными параметрами районных кондиций для россыпных месторождений являются минимальное промышленное содержание (МПС) и минимальное содержание в краевой выработке (МКВ) [5]. Эти показатели рассчитываются дифференцированно в зависимости от ширины россыпи (узкие до 80 м, широкие более 80 м), мощности торфов (до 5 м и более 5 м) и мощности песков.

Формула расчета МПС имеет вид:

$$\text{МПС} = \text{МПС}_0 + \Delta\text{МПС}_0 \times \text{квскр.},$$

где: МПС<sub>0</sub> — минимальное промышленное содержание при нулевой вскрыше;

$\Delta\text{МПС}_0$  — увеличение МПС на единицу коэффициента вскрыши;

квскр. — коэффициент вскрыши (отношение средней мощности вскрыши к средней мощности песков).

Аналогично рассчитывается МКВ для оконтуривания запасов в плане:

$$\text{МКВ} = \text{МКВ}_0 + \Delta\text{МКВ}_0 \times \text{квскр.},$$

где:  $\text{МКВ}_0$  — минимальное содержание в краевой выработке для оконтуривания в плане при нулевой вскрыше;

$\Delta\text{МКВ}_0$  — увеличение МКВ на единицу коэффициента вскрыши;

квскр. — коэффициент вскрыши (отношение средней мощности вскрыши к средней мощности песков).

Районные кондиции фиксируют нормативы ( $\text{МПС}_0$ ,  $\Delta\text{МПС}_0$ ,  $\text{МКВ}_0$ ,  $\Delta\text{МКВ}_0$ , Бортовое содержание) на момент их утверждения. Они не учитывают динамику цен на золото, заработной платы и налоговую нагрузку в конкретный период времени отработки месторождения. В то же время, локальный расчет, выполненный опытным специалистом, позволяет адаптировать эти параметры под текущую экономическую ситуацию и специфику технологии добычи.

В данной работе показаны противоречия между районными и локальными подходами к подсчету рентабельности месторождения на примере россыпного месторождения золота реки Сабарги Магаданской области [Табл.1].

Исходные данные геологического объекта:

- Горно-геологические параметры объекта:
- Средняя ширина россыпи: 120 м (относится к группе «широкие россыпи»);
- Средняя мощность торфов: 8,4 м;
- Средняя мощность песков: 0,4 м;
- Расчетный коэффициент вскрыши (квскр.): 21,75 (8,7 м вскрыши / 0,4 м песков).

Таблица 1.

Сравнительная характеристика данных районных кондиций Магаданской области и расчётных кондиций месторождения реки Сабарга

Параметры	Районные кондиции	Локальные (расчётные) кондиции
Базовые расчетные параметры		
$\text{МПС}_0$ (при нулевой вскрыше), г/м <sup>3</sup>	0,468	0,106
$\Delta\text{МПС}_0$ (прирост на единицу квскр.), г/м <sup>3</sup>	0,037	0,008
$\text{МКВ}_0$ (для оконтуривания в плане), г/м <sup>3</sup>	0,255	0,04

$\Delta\text{МКВ}_0$ (прирост на единицу квскр.), г/м <sup>3</sup>	0,027	0,006
Содержание химически чистого золота для оконтуривания пласта по мощности	0,06	0,04
Расчётные пороговые значения (при квскр. = 21,75)		
$\text{МПС} = \text{МПС}_0 + \Delta\text{МПС}_0 \times \text{квскр.}, \text{ г/м}^3$	1,273	0,275
$\text{МКВ} = \text{МКВ}_0 + \Delta\text{МКВ}_0 \times \text{квскр.}, \text{ г/м}^3$	0,842	0,168
Параметры подсчитанных запасов		
Площадь блока, тыс. м <sup>2</sup>	13,2	49,5 (+275%)
Объём песков, тыс. м <sup>3</sup>	5,3	19,8 (+274%)
Запас металла, кг	6,3	12,7 (+102%)
Экономическая эффективность (ставка дисконтирования 5%)		
Выручка от реализации, руб.	59,96 млн	120,58 млн
Себестоимость продукции, руб.	48,24 млн	74,70 млн
Чистая прибыль, руб.	5,11 млн	27,36 млн
NPV при 5%, млн руб.	-1,05 (убыток)	+20,14 (прибыль)
IRR, %	4,1% (<ставки дисконтирования)	22,0% (>> стоимости капитала)
Индекс доходности при 5%	0,99	1,16
Структура затрат		
Вскрыша торфов	0,18	0,43
Вспомогательные работы	0,62	0,4
Промывка песков	0,09	0,05
Устойчивость проекта (чувствительность $\eta$ к изменению цены металла $\pm 10\%$ )	8,26%	3,10%

Из таблицы видно разницу между районными кондициями Магаданской области и расчетными. Такое отличие может быть вызвано следующими факторами:

1) Районные кондиции часто базируются на усредненных экономических показателях, которые могут устаревать. Применение районных показателей МПС не позволяет оперативно вовлекать в отработку запасы, которые становятся рентабельными при росте цен на металл. Локальный расчет позволяет учесть актуальную цену реализации и реальную себестоимость.

2) Сравнение статей затрат в двух сценариях показывает существенные различия в подходах к планированию. Вспомогательные работы не зависят от площади блоков, вовлекаемых в отработку, и в районные кондиции они составляют 62% против 40% в локальном расчете. Это свидетельствует о том, что районные нормативы могут не учитывать специфику технологии добычи на конкретном участке, что приводит к завышению себестоимости и искусственному занижению рентабельности.

3) Анализ чувствительности показывает, что проект, оцененный по локальным кондициям, обладает значительно большим запасом прочности. При изменении стоимости металлов на  $\pm 10\%$  отклонение NPV в локальном сценарии составляет 3,10% ( $\eta$ ), тогда как в районном — 8,26% ( $\eta$ ). Проект по локальным кондициям остается устойчивым к колебаниям цен на топливо и заработной платы, тогда как районный вариант находится в зоне убыточности даже при базовых параметрах.

Противоречие между районными кондициями Магаданской области и расчётами — это не техническая погрешность, а системная проблема. Районные кондиции полезны как инструмент предварительной оценки однотипных объектов, но не могут заменять индивидуальное технико-экономическое обоснование для конкретных месторождений.

Учет локальных геологических, технологических и экономических особенностей — обязательное условие для корректной оценки запасов, минимизации инвестиционных рисков и эффективного использования недр. Как показывает пример реки Сабарги, пренебрежение этой спецификой может привести к ошибочному отклонению перспективных проектов, тогда как их реализация способна обеспечить значительный экономический эффект.

Постановка месторождения на государственный баланс запасов должно базироваться на принципе рационального недропользования. Игнорирование локальных особенностей ведет к множеству негативных последствий:

- 1) занижение количества месторождений и снижение объемов минерально-сырьевой базы;
- 2) потеря инвестиционной привлекательности потенциально рентабельных объектов;
- 3) нерациональное использование недр.

Переход от формального применения районных кондиций к индивидуальному технико-экономическому обоснованию (ТЭО) повышает прозрачность оценки запасов и снижает инвестиционные риски. Однако для мелких объектов (месторождений) процедура индивидуального ТЭО может быть избыточна, поэтому важно сохранить возможность использования районных кондиций как предварительного инструмента с обязательной верификацией локальными данными при переходе к эксплуатации.

Важно, чтобы:

1) районные кондиции были не единственным критерием для принятия решения о постановке месторождения на баланс. При наличии противоречий с реальными экономическими показателями приоритет должен отдаваться расчетным кондициям;

2) параметры районных кондиций должны регулярно пересматриваться (как минимум один раз в год) с учетом инфляции, динамики цен на золото и изменений в налогообложении;

3) критически важно привлекать опытных специалистов (инженеров, геологов), способных выявить скрытый экономический потенциал объекта, недоступный при усредненном подходе;

4) государственным органам следует предусмотреть упрощенную процедуру согласования индивидуальных кондиций для мелких месторождений, чтобы стимулировать вовлечение их в освоение без избыточной бюрократической нагрузки.

### Литература

1. Распоряжение МПР России от 05.06.2007 №37-р «Об утверждении методических рекомендаций по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчёта запасов месторождений твёрдых полезных ископаемых».

2. ФГБУ «ЦНИГРИ». Методические рекомендации по разведке техногенных месторождений россыпного золота и платиноидов.

3. ФБУ ГКЗ. Требования к составу и оформлению материалов ТЭО кондиций для подсчёта запасов месторождений твёрдых полезных ископаемых, 2025.

4. Магаданская область. Википедия. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Магаданская\\_область](https://ru.wikipedia.org/wiki/Магаданская_область)

5. ФБУ ГКЗ. Методические рекомендации по применению геостатистических методов при подсчёте запасов, 2023.

## ОСОБЕННОСТИ ЗОНАЛЬНОСТИ СКАРНОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НАСЕДКИНО (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

М.А. Богуславский<sup>1</sup>, Д.М. Коршунов<sup>1</sup>, М. А. Якушик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет, Москва

<sup>2</sup>ФГБУН институт экспериментальной минералогии имени академика д.с. Коржинского

Месторождение Наседкино (Малоурюмское) расположено в Могочинском районе Забайкальского края, в северо-восточной части Восточного Забайкалья, в южной части Олекминского Становика Витимо-Олекминской горной страны, в западной части хребта Черемного. С геологической точки зрения месторождение относится к итака-могоча-кулинской рудной зоне золото-медно-молибденового пояса Восточного Забайкалья.

В настоящем исследовании детально изучались метасоматические образования, встреченные в разведочных скважинах. В целом породы на объекте можно разделить на генетически связанные группы – протолиты и метасоматиты калиевого ряда, частично скарнированные породы и зрелые скарны. При этом изменение подвергались как магматические, так и метаморфические породы. Помимо этого, в большом количестве встречены жилы и прожилки кварцевого, карбонатного или сульфидного состава.

Интерпретация результатов геохимического исследования комплекса пород, связанных со скарновым процессом, была основана на парагенетическом анализе и количественной оценке ключевых метасоматических индикаторов. Основу классификации составили параметры, наиболее чувствительные к масштабу ионного обмена в процессе метасоматоза: отношение кальция к сумме щелочей  $Ca/(Na+K)$  как индикатор выноса подвижных катионов и привноса кальция, индекс железистости  $Fe_2O_3/Al_2O_3$ , отражающий степень скизификации, а также абсолютное содержание щелочей ( $Na_2O+K_2O$ ) и кремнезёма.

Особый интерес представляют породы близкие скарнам. Эти породы по составу (доминирование граната, присутствие кальцита, кварца, хлорита, эпидота) и условиям образования (замещение карбонатных пород) сходны с известковыми скарнами, но имеют специфические черты: крайнюю неоднородность макроскопического облика, частое отсутствие какого-либо из основных минералов: карбоната, пироксенов, волластонита, а иногда и граната.

Среди них встречены как безрудные разности, так и, наоборот, содержащие от 1 до 5% рудной минерализации. Рудная минерализация проявляется в виде прожилков, которые ассоциируют с карбонатным веществом, в виде гнездообразных скоплений, связанных с хлоритом и карбонатом или в виде интерстиционной вкрапленности между кристаллов граната.

По геохимическим особенностям эти породы были разбиты на три группы:

**«Зрелые скарны»**

Первичным и наиболее наглядным свидетельством глубокого метасоматического преобразования является радикальное изменение катионного состава пород, выраженное в экстремальных значениях базовых индексов. Отношение  $Ca/(Na+K)$ , достигающее величин от 90 до 2949, однозначно фиксирует катастрофический вынос щелочных элементов (натрия и калия) и тотальное преобладание кальция, что служит количественным выражением масштаба кальциевого метасоматоза. Параллельно индекс железистости  $Fe_2O_3/Al_2O_3$ , варьирующий от 1.13 до 5.25,

#### ***«Промежуточные метасоматиты»***

Эти образцы, занимающие промежуточное положение между неизменёнными протолитами и зрелыми скарнами, фиксируют динамический фронт преобразований, где ключевые геохимические индикаторы демонстрируют переходные, но значимо отличающиеся от протолита значения. Центральным процессом, отражающим суть начавшегося скарнообразования, является интенсивный привнос кальция и начало обогащения железом при одновременном выносе щелочей. Это количественно выражается в значительном росте отношения  $CaO/Al_2O_3$  до значений 1.13–2.79, что на порядок превышает фоновые уровни характерные для протолита, но ещё не достигает пиковых значений характерных для «зрелых скарнов». Параллельно индекс железистости  $Fe_2O_3/Al_2O_3$  повышается до 0.27–1.24, сигнализируя о начале «вызревания». Кардинальная перестройка катионного состава наиболее наглядно проявляется в отношении  $Ca/(Na_2O+K_2O)$ , которое достигает величин 5.5–25.2, что свидетельствует об активном, но ещё не завершённом выщелачивании натрия и калия из породы. При этом абсолютное содержание щелочей падает до 1.04–3.0%, что в 2–5 раз ниже, чем у исходных гранитоидов.

#### ***«Скарнированные породы»***

Эти породы, являясь вмещающей средой, характеризуются принципиально иным геохимическим составом, резко контрастирующим со скарнами. Их чертой является доминирование кремнезёма, алюминия и щелочей, что количественно выражается в низких значениях основных индикаторов скарнообразования: отношения  $Ca/(Na+K)$  находятся в пределах 0.176–2.012, а  $Fe_2O_3/Al_2O_3$  не превышает 0.39. Такие величины однозначно указывают на сиаллитовый (кислый) состав пород, типичный для гранитоидов (или плагиоклаз-полевошпатовых гнейсов), и полное отсутствие масштабного привноса кальция и железа. Доминирующим типом метасоматических изменений в этой группе является щелочной метасоматоз, выражающийся в значительном варьировании абсолютного и относительного содержания натрия и калия. Сумма щелочей ( $Na_2O+K_2O$ ) достигает 13.45%, а отношение  $K_2O/Na_2O$  колеблется от 0.22 до 8.28. Особенно показателен образец 033-36.9 с содержанием  $K_2O$  12.01% и отношением  $K_2O/Na_2O$ , равным 8.28, что служит эталонным примером

интенсивной калиевой метасоматизации (березитизации). Одновременно с этим фиксируется и натриевая ветвь изменений, представленная образцом 010-121.2 с низким отношением  $K_2O$  к  $Na_2O$  составляющий 0.22, характерным для альбитизации.

### ***Заключение***

Проведённое геохимическое исследование трёх парагенетически связанных групп пород позволило реконструировать полный цикл высокотемпературного контактово-метасоматического процесса и объективно оценить его рудный потенциал. Анализ выявил чёткую последовательность преобразований, начинающуюся с магматического субстрата. Исходные или слабо изменённые гранитоидные породы, представляющие вмещающую среду, характеризуются доминированием кремнезёма, алюминия и щелочей при низких значениях ключевых индикаторов, таких как  $Ca/(Na+K)$  (0.18–2.01) и  $Fe_2O_3/Al_2O_3$  (0.06–0.39). В этих породах зафиксированы ранние околорудные изменения щелочного метасоматоза – березитизация и пропилитизация, сопровождающиеся формированием первичных литохимических ореолов с аномалиями меди и свинца.

Конечным продуктом метасоматоза являются зрелые скарны. Их геохимический облик определяется абсолютным доминированием кальция и железа при практическом отсутствии щелочей, что отражается в экстремальных значениях параметров:  $Ca/(Na+K)$  превышает 90, достигая в некоторых случаях нескольких тысяч, а  $Fe_2O_3/Al_2O_3$  колеблется от 1.1 до 5.3. Именно эта группа является непосредственным рудовмещающим горизонтом. В ней выявлена комплексная минерализация, включающая несколько генетически связанных, но пространственно обособленных типов.

Таким образом, исследование подтверждает классическую стадийную модель скарнообразования и устанавливает для неё количественные геохимические критерии. Резкий рост отношений  $Ca/(Na+K) > 10$  и  $Fe_2O_3/Al_2O_3 > 1$  служит прямым указанием на скарновое тело.