

Таким образом, Россия имеет все возможности выйти по производству скандия на 1 место в мире, а по редким землям уверенно занять 2 место после КНР.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов, А.М.* От разработки до освоения. Универсальная технология разделения РЗЭ на центробежных экстракторах / А.М. Абрамов, Ю.Б. Соболев, Ж.Н. Галиева, В.О. Геря и др. // Экстракция и мембранные методы в разделении веществ: Тезисы докладов междунар. конф. (РХТУ им. Д.И. Менделеева), 2018. — С. 11–12.
2. *Ануфриева, С.И.*, Природные и техногенные источники получения функциональных материалов на основе редких земель и скандия / С.И. Ануфриева, Л.З. Быховский, Е.Г. Лихникевич, Н.А. Пермякова // Тр. Кольского научного центра РАН, 2018. — Т. 9. — № 2–1. — С. 118–121.
3. *Архангельская, В.В.* Руды редкоземельных металлов России / В.В. Архангельская, Т.Ю. Усова, Н.И. Лагонский, Л.Б. Чистов // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. — М.: ВИМС, 2006. — № 19. — 72 с.
- Быховский, Л.З.* Задачи дальнейшего изучения Томторского рудного поля с целью повышения его инвестиционной привлекательности / Л.З. Быховский, Е.И. Котельников, Е.Г. Лихникевич, В.С. Пикалова // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 9. — С. 20–25.
4. *Быховский, Л.З.* Минерально-сырьевая база редких металлов Северо-Запада России — основа создания Центра редкометаллургии промышленности страны / Л.З. Быховский, В.С. Пикалова // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 1. — С. 3–7.
5. *Быховский, Л.З.* Экономическая целесообразность извлечения редких элементов из красных шламов / Л.З. Быховский, Б.С. Розов // Бюллетень ОНТИ ВИМС. — 1965. — № 2 (55). — С. 38–39.
6. *Гасанов, А.А.* Некоторые тенденции мирового рынка РЗМ и перспективы России / А.А. Гасанов, А.В. Наумов, О.В. Юрасова, И.М. Петров, Т.Е. Литвинова // Изв. высших учебных заведений. Цветная металлургия. — 2018. — № 4. — С. 31–44.
7. *Глущенко, Ю.Г.* РЗЭ — дорожная карта РФ / Ю.Г. Глущенко, А.В. Нечаев, Е.Г. Поляков // Актуальные вопросы получения и применения РЗМ — 2015: Сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. — М.: ОАО «Институт «ГИНЦВЕТМЕТ», 2015. — С. 23–26.
8. *Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2019 г.* Вып. 26. Редкоземельные металлы / Составитель Р.С. Монтин. — М.: ФГБУ «Росгеолфонд», 2019. — 86 с.
9. *Лопатко, С.В.* Фактор «Фукусимы» на рынке редкоземельных элементов / С.В. Лопатко, А.Б. Макеев // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 1. — С. 54–60.
10. *Машковцев, Г.А.* Перспективы рационального освоения комплексных ниобий-тантал-редкоземельных месторождений России / Г.А. Машковцев, Л.З. Быховский, А.А. Рогожин, А.В. Темнов // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 6. — С. 9–13.
11. *Мелентьев, Г.Б.* Перспективы развития промышленности редкоземельных металлов в России / Г.Б. Мелентьев, А.В. Тарасов // Цветная металлургия. — 2016. — № 1. — С. 54–61.
12. *Петров, И.М.* Перспективы и возможности использования вторичных ресурсов для производства редкоземельных металлов / И.М. Петров, С.А. Черный, А.И. Петрова // Экологический вестник России. — 2015. — № 12. — С. 38–42.
13. *Пробуждение российского скандия?* // Металлургический бюллетень. — 2018. — № 4–5 (192). — С. 76–81.
14. *Редкоземельное и скандиевое сырье России* / Л.З. Быховский, С.Д. Потанин, Е.И. Котельников, В.В. Архангельская, С.И. Ануфриева, Л.В. Игневская, Е.Г. Лихникевич, Л.В. Спорыхина. — М.: ВИМС, 2016. — 216 с.
15. *Самонов, А.Е.* Сырьевые приоритеты скорейшего возрождения и устойчивого развития редкоземельной промышленности в России / А.Е. Самонов // Цветные металлы. — 2012. — № 3. — С. 16–21.
16. *Темнов, А.В.* Государственное стимулирование добычи редких металлов / А.В. Темнов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2019. — № 5 (168). — С. 35–46.
17. *Темнов, А.В.* Сценарии реализации минерально-сырьевого потенциала комплексных редкометаллургии месторождений Зиминского рудного района / А.В. Темнов, В.С. Пикалова // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 7. — С. 54–60.

18. *Толстов, А.В.* Новые возможности получения редкоземельных элементов из единого арктического сырьевого источника / А.В. Толстов, Н.П. Похиленко, Н.Ю. Самсонов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. — 2017. — Т. 10. — № 1. — С. 125–138.

© Быховский Л.З., Пикалова В.С., Лихникевич Е.Г., 2020

*Быховский Лев Залманович* // lev@vims-geo.ru  
*Пикалова Варвара Сергеевна* // pikalova@vims-geo.ru  
*Лихникевич Елена Германовна* // likhnikевич@mail.ru

УДК 553.44:553.061

**Волков А.В., Галямов А.Л. (ИГЕМ РАН)**

### ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ КРУПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРАТЕГИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ

*В статье рассмотрены результаты изучения методами ГИС-анализа соотношения металлогении с геодинамическими обстановками крупных месторождений стратегических металлов в Арктической зоне России (АЗР). Выявлено сходство геодинамических обстановок формирования невадийских и сакындинских месторождений золота Карлинского типа (МЗКТ), что подтверждает высокие перспективы открытия крупных месторождений в этом арктическом районе Якутии. Новые рудные районы с МЗКТ прогнозируются на всем протяжении Черско-Полоусненского покровно-складчатого пояса (Кольмской петли). Приведенные материалы показывают высокие перспективы открытия на Северо-Востоке России новой металлогенической провинции МЗКТ. **Ключевые слова:** Арктическая зона, крупные месторождения, стратегические металлы, Карлинский тип, прогноз.*

Volkov A.V., Galyamov A.L. (IGEM)

### GEODYNAMIC SETTING OF LARGE DEPOSITS OF STRATEGIC METALS IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA

*The article considers the results of studying the correlation of metallogeny with geodynamic setting of large deposits of strategic metals in the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF) by GIS-analysis methods. The similarity of geodynamic conditions of formation of Nevada and the Sakyndza area Carlin type gold deposits (CTGD) is revealed that confirms high prospects of opening the CTGD in this Arctic region of Yakutia. New ore districts with CTGD predicted throughout Chersko-Poluosninsky fold-thrust belts (Kolyma loop). The presented materials show high prospects for the discovery of a new metallogenic province of CTGD in the North-East of Russia. **Keywords:** Arctic zone, large deposits, strategic metals, Carlin type, forecast.*

#### Введение

Арктическая зона России (АЗР) полукольцом охватывает окраину Евразийского континента и многочисленные острова вокруг Северного Ледовитого

океана (рис. 1). Недра АЗР богаты не только стратегическими высокотехнологичными металлами, но и другими ценными полезными ископаемыми.

В рамках проекта РФФИ была создана пространственная база данных (БД) месторождений стратегических металлов Арктики. Исходные материалы БД — открытые источники глобальных и локальных пространственных геологических, геофизических и геохимических данных, размещающиеся на сайтах геологических служб Европы, США и других стран мира, корпоративных и волонтерских сетей, а также результаты геологического изучения за счет средств федерального бюджета на территории Российской Федерации и стран СНГ.

База данных по Арктике включает информацию о размещении более 26 тысяч объектов — рудных и россыпных месторождений, рудопроявлений, точек минерализации, в том числе в России — более 8 тысяч. База данных по рудным объектам через координатную систему связана с бесшовной цифровой геологической картой, масштаб которой варьирует от 1:2 500 000 до 1:50 000 в зависимости от тематики включенных в базу данных слоев.

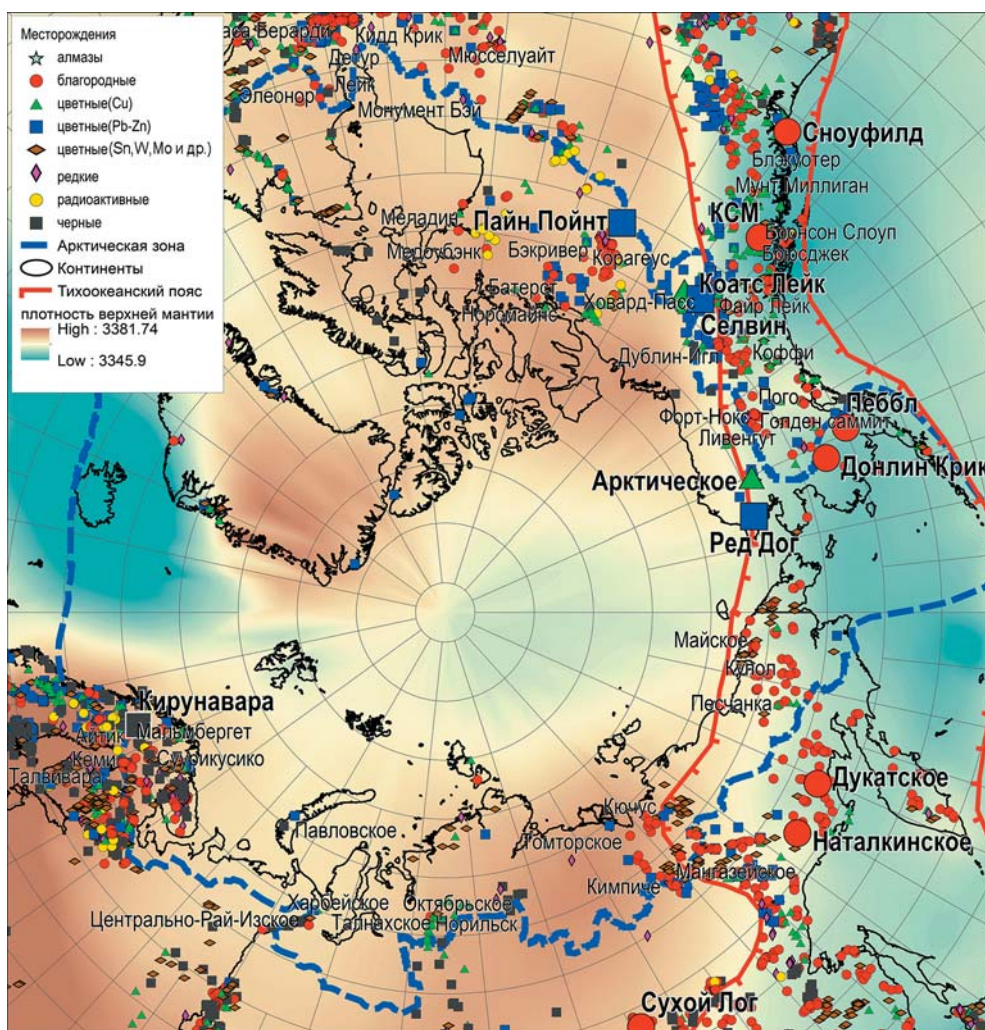


Рис. 1. Схематическая карта плотности верхней мантии [9] и распределения основных месторождений и перспективных рудопроявлений стратегических металлов в Арктике

В статье рассмотрены результаты изучения методами ГИС-анализа соотношения металлогении с геодинамическими обстановками крупных месторождений стратегических металлов в Арктической зоне России (АЗР). В качестве примера оценки перспектив рудоносности приведены результаты сравнительного металлогенического анализа геодинамических обстановок формирования месторождений золота Карлинского типа (МЗКТ) на основе современных геофизических моделей литосферы Верхоянской, Невадиийской и Южнокитайской металлогенических провинций.

#### Геодинамические обстановки рудообразования

По данным пространственного ГИС анализа БД, подавляющее большинство рудных месторождений АЗР размещается в терригенных и вулканогенных комплексах, гранитоидах и метаморфических комплексах древнего основания. Месторождения благородных металлов, меди, свинца и цинка залегают преимущественно в терригенных и вулканогенных комплексах (в т.ч. радиоактивные руды), а также в гранитоидах. Для проведения ГИС-анализа применялись известные методические приемы, заложенные в аналитический аппарат ARCMAP, MAPINFO и других картографических математико-аналитических систем.

Наиболее эффективными показали себя устойчивые методы выявления и оценки пространственных связей (растровой алгебры, нечеткой логики, вероятностного анализа и др.).

Металлогения других цветных металлов (олово, вольфрам, молибден и др.) проявлена преимущественно в гранитоидных интрузивах и их обрамлении, сложенном терригенными комплексами. Руды редких металлов и редкоземельных элементов связаны с щелочными и субщелочными интрузивами в основном в древнем фундаменте. Месторождения черных металлов (железо, титан, хром и др.) тесно ассоциируют с базитами и ультрабазитами, а также с формацией железистых кварцитов в выступах древнего основания. В табл. 1 представлено соотношение минералообразующих систем и геодинамических обстановок в АЗР.



**Таблица 1**  
**Соотношение минералообразующих систем и геодинамических обстановок**

Геодинамическая обстановка	Минералообразующая система	Минеральные типы месторождений
Зоны щелочного гранитоидного магматизма в кратонах	Щелочно-гранитодная	Кимберлитовый алмазоносный, апатит-нефелиновый РЗЭ-редкометалльный в расслоенных щелочных интрузиях (REE-P-U) медно-никелевый платиноносный (Ni-Cu-PGE)
Континентальные рифты, крупные изверженные провинции (LIP), срединно-океанические хребты	Мафит-ультрамафитовая ортомагматическая	Сульфидный Ni-Cu, Ni-Cu-Co и Ni-Cu-PGE, хромититовый, оксидный Fe-Ti-V с магнетитом
Активные окраины, аккреционно-коллизионные террейны	Порфировая эпитермальная	Порфиновый Cu-Au-Mo, эпитермальный Au-Ag, Ag-Zn-Pb и Au-Cu, скарновый Cu-Au и Zn-Pb-Ag
Срединно-океанические хребты (COX), островодужные структуры, рифтогенные прогибы	Подводная вулканогенная	Медно-колчеданный (VHMS), колчеданно-полиметаллический
Пассивные континентальные окраины, включая рифтогенные прогибы	Осадочно-гидротермальная	Стратиформные MVT- и SEDEX-типы
Области орогенного и посторогенного магматизма	Гранитоидная	Золотокварцевый жильный, золотосульфидно-кварцевый, МЗКТ, грейзеновый Sn-W-F, пегматитовый Ta-Nb-Li-Be, порфиновый Mo
Орогенез	Орогенная	Гидротермальное жильное Au, Cu, Zn-Pb-Ag с сульфидами
Области анорогенного гранитоидного магматизма	Железо-оксидная	Железо-оксидный медно-золоторудный (IOCG)

В континентальной части АЗР наиболее рудоносными и перспективными на выявление новых объектов стратегических металлов являются три геодинамические обстановки, в формационных комплексах которых залегает подавляющее большинство (более 70 %) месторождений (табл. 1): 1) выступы древнего основания, включающие блоки архейских кратонов, древние рифтогенные структуры и области орогенной активизации; 2) ареалы формаций пассивной континентальной окраины, включая современные рифтогенные структуры; 3) комплексы активной окраины, включая островодужные вулканические постройки.

В выступах древнего основания, в пределах Балтийского щита и др., размещается около 30 % месторождений стратегических металлов. Важное место по числу месторождений (30 %) в России занимают ареалы пассивной континентальной окраины и зоны континентальных и субконтинентальных рифтогенных прогибов. Здесь преобладают месторождения цветных и благородных металлов, расположенные в складчатом обрамлении Сибирской платформы и на Среднем Урале. В обстановках активной окраины, включая островные дуги (около 30 %), наибольшим распространением в зоне влияния Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса и в островодужных комплексах Камчатки пользуются объекты благород-

ных, цветных и черных металлов, причем в областях конвергенции пассивного режима восточной окраины Сибирского кратона число месторождений указанных типов несколько больше.

Литосфера АЗР, сформированная в ходе нескольких суперконтинентальных циклов, включает древние щиты (Балтийский, Анабарский), перекрывающие их позднедокембрийский и палеозойский платформенные чехлы, складчатые орогенные пояса (Каледонский, Уральский, Таймырский, Тиманский, Верхояно-Чукотский), разделяющие древние платформы (Восточно-Европейскую, Сибирскую и Северо-Американскую), внутриплитные магматические провинции различных эпох от раннего докембрия до кайнозоя и мезозойские вулканогенные пояса (Святоосно-Олойский, Уяндино-Ясаченский и Охотско-Чукотский).

Геодинамические обстановки развития литосферы на западном и восточном флангах российской Арктики заметно отличались друг от друга. По представлениям Л.М. Парфенова [5] на Северо-Востоке России пассивные и активные континентальные окраины с островными дугами существовали, начиная с рифея. Позднее в этом регионе Евразии происходила длительная кратонизация, которая завершилась лишь в позднем мезозое. Следует отметить, что эта группа геодинамических обстановок принадлежит Тихоокеанскому рудному поясу (рис. 1). Соотношение минералообразующих систем и геодинамических обстановок показано в табл. 1.

К геодинамическим обстановкам западной части АЗРФ в докембрийских щитах и на их периферии относятся:

1. Континентальные рифты, крупные изверженные провинции. Именно в этой обстановке формируются сульфидный Ni-Cu, Ni-Cu-Co и Ni-Cu-PGE, хромититовый, оксидный Fe-Ti-V с магнетитом минеральные типы месторождений Норильского рудного района и Карело-Кольского региона.

2. С обстановкой внутриплитного щелочно-гранитоидного магматизма связаны кимберлитовый и лампроитовый алмазоносный, апатит-магнетит-РЗЭ-редкометалльный карбонатитовый, апатит-нефелиновый РЗЭ-редкометалльный в расслоенных щелоч-

ных интрузиях минеральные типы крупных месторождений Балтийского и Анабарского докембрийских щитов.

3. В обстановках пассивной континентальной окраины, осадочных бассейнах и рифтогенных прогибах образовались стратиформные месторождения MVT- и SEDEX-типов, Cu-Co-Ag-песчаники и сланцы (Пай-Хой, Новая Земля, Полярный Урал), U-типа несогласия (Анабарский щит).

4. В зеленокаменных поясах Балтийского и Анабарского щитов формировались месторождения золота орогенного типа, Ni-Cu-PGE и колчеданно-полиметаллические, золотоносные конгломераты, редкометалльные пегматиты и железистые кварциты.

Геодинамические обстановки Тихоокеанского рудного пояса представлены:

1. Островодужными террейнами и окраинно-континентальными вулканическими поясами, зонами посторогенной тектономагматической активизации. В этих обстановках формируются месторождения Cu-Mo-Au-, Cu-Mo- и Cu-Au-порфирового, МЗКТ, Au-Ag-, Ag-Zn-Pb- и Au-Cu-эпитермального, Cu-Au- и Zn-Pb-Ag скарнового типов Чукотки.

2. Срединно-океаническими хребтами (СОХ), островодужными поясами, рифтогенными прогибами

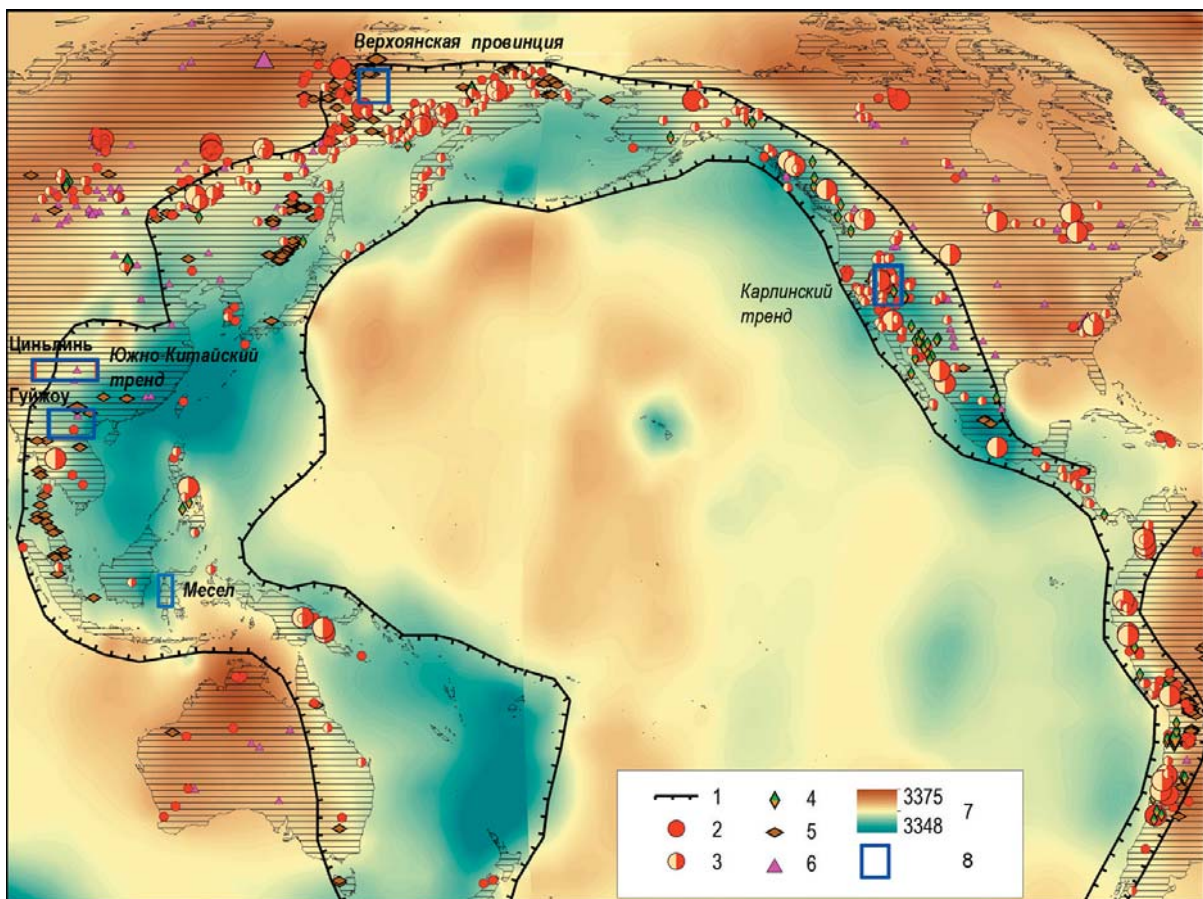
с медно-колчеданными (VHMS) и колчеданно-полиметаллическими типами месторождений (Полярный Урал, Майницкий терреин, Северная Корякия).

3. Коллизионно-аккреционные террейны пассивной континентальной окраины, области орогенного и посторогенного магматизма. С этой обстановкой связаны: золотокварцевый жильный, золотосульфидно-кварцевый штокверковый, золотосульфидный вкрапленный, грейзеновый Sn-W-F, Sn-сульфидный, Ta-Nb-Li-Be пегматитовый, Mo-порфиновый, Mo-U гидротермальный, Au- связанные с интрузивами гранитоидов, Zn-Pb-Ag- жильный типы месторождений. В коллизионных швах локализуются амагматичные Hg, МЗКТ, Au-Sb-Hg и Au-Sb месторождения (северо-восток Якутии, западная и центральная Чукотка).

4. Задуговые бассейны, области анорогенного гранитоидного магматизма, вмещающие крупные железо-окисно-медно-золоторудные месторождения (IOCG-типа). Прогнозируются на северо-востоке Якутии и Чукотке.

#### Геофизическая модель литосферы и МЗКТ

В качестве примера оценки перспектив рудоносности рассмотрим результаты сравнительного металлогенического анализа геодинамических обстановок формирования месторождений золота Карлинского



**Рис. 2. Пространственное размещение районов МЗКТ в Тихоокеанском рудном поясе по данным ГИС-анализа на карте плотности верхней мантии, проект CRUST 2.0 [11]: 1 — границы Тихоокеанского рудного пояса; 2–6 — месторождения: 2 — Au в терригенных толщах, 3 — Au-Ag эпитеpмальные, 4 — Cu-Mo-Au-порфиpовые, 5 — Sn, 6 — pедкометалльные; 7 — плотность верхней мантии (г/см<sup>3</sup>); 8 — рудные районы с МЗКТ**

типа (МЗКТ) на основе современных геофизических моделей литосферы Верхоянской, Невадийской и Южнокитайской металлогенических провинций.

МЗКТ представляет собой крупные метасоматические тела джаспероидов в карбонатных вмещающих породах, которые содержат субмикроскопическое тонкодисперсное золото во вкрапленном пирите или марказите. Месторождения встречаются в рудных узлах (кластерах), сосредоточенных вдоль достаточно протяженных трендов (разломов). Для МЗКТ характерны сходные гидротермальные изменения и рудные парагенезисы: растворение и окремнение карбоната; сульфидизация железа во вмещающих породах; формирование Au содержащего мышьяковистого пирита и марказита происходило в закрытой системе, а позднее, в открытой системе — отложение аурипигмента, реальгара и антимонита, минералов таллия [2].

За пределами Невады вкрапленные месторождения Au в осадочных породах сосредоточены на юге Китая (рис. 2) и встречаются локально по всему миру, в частности, на Балканах. Хотя тектонические обстановки формирования этих месторождений отличаются от Невадийских, вкрапленные месторождения Au в осадочных породах Западно-Циньлинского пояса и области Диан-Цянь-Гуй южного Китая и месторождение Алшар в Козуфском районе Македонии наиболее близки к МЗКТ [2]. В последнем отчете геологической службы США Карлинский и Китайский подтипы месторождений объединяются в рамках одной популяции (класса) — месторождений золота в осадочных толщах («sediment-hosted gold deposits»), которые характеризуются вкрапленным микронным невидимым золотом [8].

По многим объектам в мире высказываются противоположные версии относительно того, Карлинского типа это месторождение или только похоже на него, или оно относится к другому типу месторождений золота в осадочных породах. Так, к Карлинскому типу в России отнесены некоторые месторождения Урала (Воронцовское и Светлинское), Верхнего Приамурья (Чагойанский рудный узел), Южной Якутии (Гас-Юрях) [6]. Сходство перечисленных месторождений с месторождением Карлин обосновывалось преимущественно на минералого-геохимических характеристиках руд.

Детальные структурно-формационные, стратиграфические, литологические и минералого-геохимиче-

**Таблица 2**

**Сравнительная характеристика геодинамических обстановок формирования МЗКТ США, России и КНР**

Параметры	США	Россия	Южный Китай	
	Невада	Верхояно-Колымская область	Провинция Циньлин	Провинция Гуйчжоу
Возраст	Третичный	Верхнемезозойский	Юрско-меловой?	Меловой?
Геодинамическая обстановка	Континентальная магматическая дуга, наложенное растяжение	Коллизионная магматическая дуга, посторогенное поднятие и растяжение	Коллизионная магматическая дуга, посторогенное поднятие и растяжение	Вне пределов магматической дуги. Постконтракционный период релаксации (растяжения)
Земная кора	Приуроченность к крупным блокам повышенных значений гравитационного поля, к областям менее мощной земной коры	Приуроченность к крупным блокам пониженных значений гравитационного поля, к областям наиболее мощной земной коры	На периферии крупных блоков повышенных значений гравитационного поля, к областям менее мощной земной коры	
	Приуроченность к участкам коры с наименьшей толщиной слабометаморфизованного осадочного слоя		На окраине участков коры увеличенной мощности слабометаморфизованного осадочного слоя	

ские исследования в 1996–1998 гг. на Селенняхском хребте (рис. 2) показали, что группа золоторудных проявлений Сакындинского рудного района (Арбат, Гал-Хая и др.) сформировалась в такой же геодинамической обстановке, что и группа месторождений Карлинского тренда [6].

Для объяснения закономерностей размещения и условий формирования МЗКТ в докладе проанализированы современные геофизические исследования литосферы: поверхности Мохо, плотности и термального режима верхней мантии [7, 9, 10, 12]. Новая модель GEMMA основана на базе данных о толщине земной коры по результатам сейсмических исследований и унаследована из модели CRUST2.0 [12]. Типы коры определялись в зависимости от возраста фундамента или тектонических условий [9], и для каждой ячейки сети даны глубина границы Мохо, скорость сжатия и скорость сдвига, а также дана плотность для 8 слоев: воды, льда, трехслойного осадочного чехла и верхней, средней и нижней кристаллической коры. Данные осадочных слоев в основном соответствуют модели [9].

Результаты сравнительного анализа геодинамических обстановок формирования МЗКТ в штате Невада, Южном Китае и Северо-Востоке России приведены в табл. 2.

Отметим, что вмещающие МЗКТ породы всех трех регионов в дорудный этап были деформированы с образованием рудоконтролирующих структур, а рудные районы включают также осадочно-эксталяционные, полиметаллические связанные с интрузиями, и свинцово-цинковые стратиформные месторождения



миссисипского типа. Вместе с тем, южно-китайские месторождения размещены в более кремнистых породах, тогда как руды в Неваде и Верхоянье — в более известковистых породах.

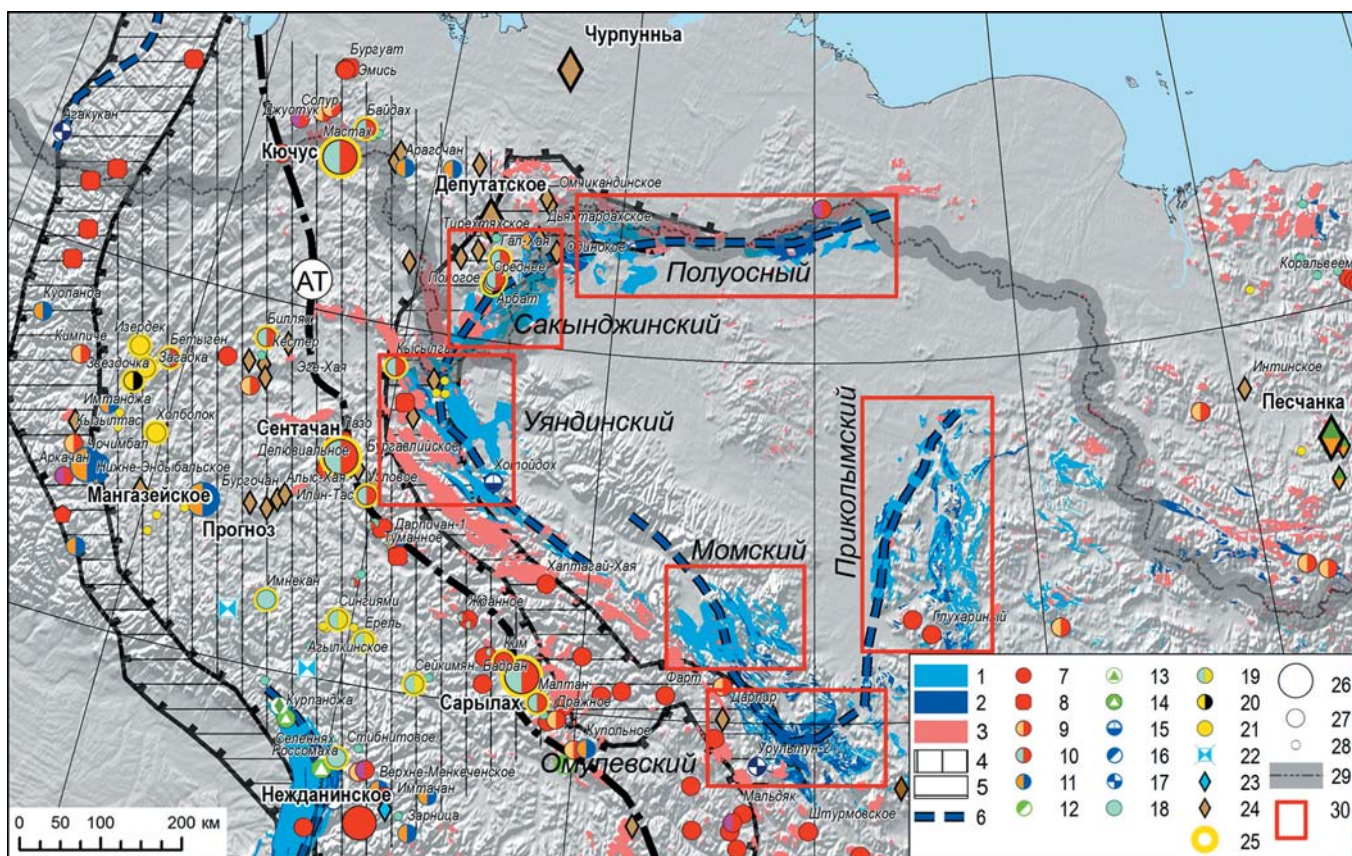
В региональном плане МЗКТ пространственно приурочены к крупным блокам пониженной плотности и массы (гравитационное поле), соответствующим областям наиболее мощной земной коры; невадийские и верхоянские месторождения приурочены к участкам коры с наименьшей толщиной слабометаморфизованного осадочного слоя. При этом такой закономерности в размещении китайских объектов не отмечается; невадийские и верхоянские месторождения пространственно контролируются относительно менее плотными и более нагретыми участками верхней мантии. Последнее не относится к китайским объектам, размещающимся на границе «прогретой» и «остывшей» области верхней мантии (табл. 2).

Выполненный анализ геофизических моделей и геодинамических обстановок позволяет прогнозировать новые рудные районы с МЗКТ в Черско-Полоуснен-

ском покровно-складчатом поясе (Колымской петле) (рис. 3). Здесь силурийские и девонские рифовые системы закартированы в составе отложений карбонатных платформ [1]. Нами выделяются Яно-Индигорский, Момский, Омuleвский, Приколымский и Нижне-Колымский сегменты (потенциальные рудные районы) Верхоянской провинции. Яно-Индигорский сегмент Черско-Полоусненского пояса включает Сакинджинский рудный район (рис. 3). Перечисленные выше потенциальные рудные районы, за исключением Момского, по геофизическим и геологическим данным обла- дают большим сходством с Сакинджинским районом.

### Заклучение

В статье рассмотрены результаты изучения методами ГИС-анализа соотношения металлогении с геодинамическими обстановками в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ). В основу исследования положена обновленная база данных по Арктике, включающая информацию о размещении более 26 тыс. объектов — рудных и россыпных месторождений, рудопроявлений, точек минерализации, в том числе



**Рис. 3.** Карбонатные формации, рифовые постройки, гранитоидные и диоритовые интрузивные образования Верхоянской провинции и позиция месторождений различных рудноформационных типов (с использованием материалов [1,3,4]): 1–3 — формации: 1 — терригенно-карбонатная, 2 — карбонатная, 3 — гранитоиды; 4 — внешний и 5 — внутренний шельф; 6 — ось рифовых построек; 7–25 — рудные формации: 7 — Au-кварцевая жильная, 8 — Au-сульфидно-кварцевая, 9 — Au-Ag эпитермальная, 10 — Au-Sb, 11 — Ag-полиметаллическая, 12–13 — Cu-колчеданная в вулканогенных (12) и осадочных (13) породах, 14 — Cu песчанников, 15 — колчеданно-полиметаллическая в терригенных породах, 16 — Pb-Zn в вулканогенных породах, 17 — Pb-Zn стратиформная в карбонатных породах, 18 — кварц-антимонитовая, 19 — Sb-Hg эпитермальная, 20 — кварц-дикитовая эпитермальная, 21 — Hg аргиллизитовая, 22 — W-Mo скарновая, 23 — W-Mo грейзеновая, 24 — касситерит-силикатная, 25 — МЗКТ; масштабность месторождений: 26 — крупные, 27 — средние и мелкие, 28 — рудопроявления; 29 — Арктическая зона РФ; 30 — перспективные на открытие МЗКТ рудные районы

в России — более 8 тыс. По данным ГИС-анализа в выступах докембрийского фундамента, террейнах пассивной и активной континентальных окраин размещено практически равное количество объектов (30 %), а в коллизионной обстановке — 9 % общего количества.

Показано, что в результате анализа геофизических моделей земной коры выявлено сходство геодинамических обстановок формирования невадийских и сакындинских МЗКТ, что подтверждает высокие перспективы открытия крупных месторождений в этом арктическом районе Якутии. Новые рудные районы с МЗКТ прогнозируются на всем протяжении Черско-Полоуэнского покровно-складчатого пояса (Колымской петли).

Приведенные в статье материалы показывают высокие перспективы открытия на Северо-Востоке России новой металлогенической провинции месторождений золота Карлинского типа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-70001) «Изучение геологических и геодинамических обстановок формирования крупных месторождений стратегических металлов Арктической зоны России: выводы для прогнозирования и поисков новых месторождений».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волков, А.В. Геолого-генетическая модель месторождений золота Карлинского типа / А.В. Волков, А.А. Сидоров // Литосфера. — 2016. — № 6. — С. 145–165.
2. Баранов, В.В. Рифовые системы в силуре и раннем девоне Северо-Востока Азии / В.В. Баранов // Отечественная геология. — 2007. — № 5. — С. 43–50.
3. Константиновский, А.А. Осадочные формации Верхоянского пояса и обстановки их накопления / А.А. Константиновский // Литология и полезные ископаемые. — 2009. — № 1. — С. 65–86.
4. Кутыгин, Р.В. Основные черты стратиграфии и палеогеографии нижнедугалахского регионального подъяруса пермской системы Якутии / Р.В. Кутыгин // Природные ресурсы Арктики и субарктики. — 2018. — Т. 25. — №3. — С. 5–21.
5. Парфенов, Л.М. Континентальные окраины и островные дуги мезозойского северо-востока Азии / Л.М. Парфенов. — Новосибирск: Наука, 1984. — 192 с.
6. Поспелов, И.И. Геодинамические условия формирования и перспективы поисков золоторудных месторождений типа Карлин в северо-восточной Якутии / И.И. Поспелов, А.Г. Буянкин, А.Н. Краснов // Вестник Госкомгеологии РС(Я). — 2002. — № 2. — С. 14–18.
7. Bassin, C. The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America / C. Bassin, G. Laske, G. Masters // EOS Trans. AGU. — 2000. — V. 81. — № 48. Fall Meet. Suppl., Abstract F897 (<http://mahj.ucsd.edu/Gabi/rem.html>).
8. Berger, V.I. Sediment-Hosted Gold Deposits of the World-Database and Grade and Tonnage Models / V.I. Berger, D.L. Mosier, J.D. Bliss, B.C. Moring / Open-File Report 2014–1074, June 2014, Virginia, Reston: U.S. Geological Survey, 2014. — 46 p.
9. Bouman, J. GOCE gravity gradient data for lithospheric modeling. Int. J. / J. Bouman, J. Ebbing, S. Meekes et al. // Appl. Earth Obs. Geoinform. — 2015. — vol. 35. — pp. 16–30.
10. Cammarano, F. Global thermal models of the lithosphere / F. Cammarano, M. Guerri // Geophys. J. Int. — 2017. — V. 210. — P. 56–72.
11. Laske, G., Masters, G., Reif, C., CRUST 2.0: A New Global Crustal Model at 2 Ч 2 Degrees, 2000. / G. Laske, G. Masters, C. Reif. (<http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/rem.html>)
12. Sampietro, D. The GEMMA crustal model: First validation and data distribution / D. Sampietro, M. Reguzzoni, N. Negretti / ESA SP, 2013. — 722p.

© Волков А.В., Галямов А.Л., 2020

Волков Александр Владимирович // tma2105@mail.ru.  
Галямов Андрей Львович // alg@igem.ru.

Герасимова Л.Г., Николаев А.И., Артеменков А.Г.  
(ИХТРЕМС КНЦ РАН, г. Апатиты)

#### ПЕРОВСКИТ — ПЕРСПЕКТИВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТИТАНА И ТИТАНОСОДЕРЖАЩЕЙ ПРОДУКЦИИ

*Механоактивация гидратированного продукта (ГП), выделенного при обработке перовскита азотной кислотой, ведет к диспергированию частиц, аморфизации их поверхности и образованию микродефектов, что значительно увеличивает его химическую активность при взаимодействии с серной кислотой. Механоактивацию целесообразно проводить в течение 4–5 ч., что связано с повышенной твердостью компонентов ГП (рутил и анатаз). Степень извлечения компонентов в сернокислотную жидкую фазу повышается до 80–85 % по  $TiO_2$ . Полученные результаты могут быть использованы при реализации азотно-сернокислотного варианта технологии перовскита с получением функциональных титаносодержащих материалов. **Ключевые слова:** перовскит, гидратный продукт, механоактивация, аморфизация частиц, кислотная обработка, функциональные материалы.*

Gerasimova L.G., Nikolaev A.I., Artemenkov A.G. (IHTRIMS KSC RAS, Apatity)

#### PEROVSKIT — A PERSPECTIVE RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF TITANIUM AND TITANIUM-CONTAINING PRODUCTS

*The mechanical activation of a hydrated product (GP), isolated during the treatment of perovskite with nitric acid, leads to the dispersion of particles, amorphization of their surface and the formation of microdefects, which significantly increases its chemical activity during interaction with sulfuric acid. It is advisable to carry out mechanical activation for 4–5 hours, which is associated with increased hardness of the components of GP (rutile and anatase). The degree of extraction of the components in the sulfuric liquid phase rises to 80–85 % in  $TiO_2$ . The results can be used to implement the nitric-sulfuric acid version of perovskite technology to obtain functional titanium-containing materials. **Keywords:** perovskite, hydrated product, mechanical activation, amorphization of particles, acid treatment, functional materials.*

Работы, связанные с кислотными способами переработки титано-редкометалльного сырья, в частности перовскита, проводятся в Институте химии Кольского научного центра РАН уже в течение длительного времени [5, 3, 9]. Основная задача, которую решают исследователи — это достижение максимальной степени перевода компонентов из минерала в состояние удобное для их разделения. Среди многочисленных вариантов особое место занимает технология, основанная на азотнокислотном разложении перовскитового концентрата, которое осуществляют в атмосферных