



III научно-практическая конференция



**МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ
БАЗА МЕТАЛЛОВ ВЫСОКИХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

ОСВОЕНИЕ, ВОСПРОИЗВОДСТВО,
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

Москва
2024

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ (РОСНЕДРА)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МИНЕРАЛЬНОГО
СЫРЬЯ ИМ. Н.М. ФЕДОРОВСКОГО» (ФГБУ «ВИМС»)

АССОЦИАЦИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ И ПОТРЕБИТЕЛЕЙ РЕДКИХ
И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ (АССОЦИАЦИЯ РМ И РЗМ)

Третья научно-практическая конференция



МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА
МЕТАЛЛОВ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

*ОСВОЕНИЕ, ВОСПРОИЗВОДСТВО,
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ*

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

21–22 ноября 2023 г.

Москва, 2024

УДК 553.04:553.493:622
Т 78

Сборник докладов Третьей научно-практической конференции «Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. «Освоение, воспроизводство, использование». М.: ФГБУ «ВИМС», 2024, 198 с.

ISBN 978-5-6049827-2-3

В сборнике представлены доклады участников III научно-практической конференции «Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. Освоение, воспроизводство, использование», состоявшейся 21–22 ноября 2023 года в ФГБУ «ВИМС». Тематика публикуемых докладов конференции:

- Перспективные проекты разведки, добычи и глубокой переработки
- Перспективы выявления и освоения месторождений металлов высоких технологий
- Передовые технологии добычи и переработки сырья
- Проблемы прогнозирования и регулирования производства и потребления отечественной промышленностью стратегических видов минерального сырья
- Поиски скрытых месторождений

The collection presents the reports of the participants of the III scientific and practical conference “Mineral resource base of high-tech metals. Development, reproduction, use”, held on November 21–22, 2023 at the FSBI “VIMS”. Topics of the published conference reports:

- Promising prospecting, exploration and deep processing projects
- Prospects for the identification and development of high-tech metal deposits
- Advanced technologies of extraction and processing of raw materials
- The problems of forecasting and regulating the production and consumption of strategic mineral raw materials by the domestic industry
- The search for concealed deposits

Организаторы конференции:

Министерство природных ресурсов и экологии (Минприроды России),
Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра),
Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ФГБУ «ВИМС»),
Ассоциация производителей и потребителей редких и редкоземельных металлов (Ассоциация РМ и РЗМ).

Оргкомитет конференции:

Председатель: Петров Е.И.

Члены оргкомитета: Бортников Н.Ф., Верчеба А.А., Гермаханов А.А., Демидов И.Л., Димухамедов Р.Р., Захаров В.Н., Казанов О.В., Карпузов А.А., Леонтьев Л.И., Машковцев Г.А., Петров В.Л., Петров В.А., Рогожин А.А., Руднев А.В., Святецкий В.С., Семёнов В.В., Спиридонов И.Г., Чантурия В.А., Черных А.И.

Партнеры:



ISBN 978-5-6049827-2-3

© Коллектив авторов
© ФГБУ «ВИМС», 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

РЕШЕНИЕ КОНФЕРЕНЦИИ	6
<i>Алматов И.М., Усенов Р.Б.</i> ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АКТАУ С ИЗВЛЕЧЕНИЕМ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ	13
<i>Андреева С.И., Татарников А.В., Мешков Е.Ю., Трошкина И.Д., Соловьев А.А.</i> СОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА СУЛЬФАТНЫХ ДЕСОРБАТОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТ ТОРИЯ И УРАНА.....	15
<i>Астахова Ю.М., Жукова В.Е., Рассулов В.А., Якушина О.А.</i> ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ ЛИТИЕВЫХ РУД ...	19
<i>Ахмедов М.Ш., Ежков Ю.Б., Холиёров А.Т.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ В РЕСПУБЛИКЕ УЗБЕКИСТАН.....	23
<i>Богатырева Е.В., Карташева А.И.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ЦЕРИЯ ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ.....	31
<i>Богатырева Е.В., Мельник Ф.</i> ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОСОДЕРЖАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ НЕОДИМА НА СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНТЕЗИРУЕМОГО КОБАЛЬТИТА НЕОДИМА.....	32
<i>Ветчинкина Т.Н., Балмаев Б.Г., Тужилин А.С.</i> ХЛОРНЫЙ СПОСОБ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФЕЛИНОВОГО И КАОЛИНОВОГО СЫРЬЯ.....	35
<i>Выдыш С.О., Богатырева Е.В.</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СЕРЕБРА ИЗ ОБЕЗМЕЖЕННЫХ ШЛАМОВ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО РАФИНИРОВАНИЯ ВТОРИЧНОЙ МЕДИ.....	37
<i>Гафуров Т.А., Турсунметов Р.А., Тё В.С., Хасанбаев Х.Ф.</i> ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СКАНДИЯ В РАССОЛАХ БУХАРО-КАРШИНСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА	39
<i>Домаренко В.А., Перегудина Е.В., Кенесбаев Б.К., Пшеничкин А.Я.</i> РЕДКИЕ ЗЕМЛИ В ЖЕЛЕЗНЫХ РУДАХ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО ПОЯСА	44
<i>Дьяченко А.Н.</i> БЕРИЛЛИЙ: ПРОДУКТОВЫЙ БАЛАНС, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ	51

<i>Еременко Е.Г., Пушков В.С., Несмеянова А.И.</i> ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РТУТНОЙ АТМОГЕОХИМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАМЕРОВ	57
<i>Зарганаев А.З., Галиева Ж.Н., Дронов Д.В., Ухорская В.О., Быданов Б.А., Шабалтас Ю.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ОРГАНИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ	65
<i>Исоков М.У., Мовланов Ж.Ж., Марипова С.Т., Рахматуллаев Ф.Ф.</i> ОФИОЛИТОВЫЕ АССОЦИАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ МЕТАЛЛОВ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В УЗБЕКИСТАНЕ	70
<i>Касиков А.Г., Щелокова Е.А., Куншина Г.Б., Бочарова И.В., Кузнецов И.А.</i> ПЕРЕРАБОТКА СПОДУМЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТА КОЛМОЗЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ПОЛУЧЕНИЕМ КАРБОНАТА ЛИТИЯ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ СИНТЕЗА ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ.....	80
<i>Копарулина Е.С., Зиганшин А.Г., Кучин В.В., Винцайтис Е.Н.</i> ПОЛУЧЕНИЕ ФТОРИДНЫХ СОЛЕЙ ЦИРКОНИЯ И ГАФНИЯ.....	89
<i>Лаломов А.В.</i> РОЛЬ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ВИДОВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ РОССИИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ.....	91
<i>Майников Д.В., Радушинский С.М., Толкачев В.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ОБЕСКРЕМНИВАНИЯ СОЛЯНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОКСИХЛОРИДА ЦИРКОНИЯ.....	98
<i>Мешков Е.Ю., Татарников А.В., Андреева С.И., Соловьев А.А., Трошкина И.Д., Бояркина Е.С.</i> СОРБЦИОННАЯ ПЕРЕРАБОТКА ПРОДУКТИВНЫХ РАСТВОРОВ ОПУ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДОБРОВОЛЬНОЕ	101
<i>Михеева Е.Д., Кузьменко П.С.</i> ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЪЕКТЫ ЛИТИЕВОГО ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ	106
<i>Морозова Л. Н., Зозуля Д.Р., Скублов С.Г.</i> СТРАТЕГИЧЕСКИЕ МЕТАЛЛЫ (ВЕ, NB, ТА, LI) МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОЛЬСКОГО РЕДКОМЕТАЛЛЬНОГО ПОЯСА (АРКТИЧЕСКАЯ ЗОНА, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ, РОССИЯ)	110
<i>Нечаев А.В., Поляков Е.Г.</i> ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМ СЫРЬЕМ ПРОГРАММЫ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ МАГНИТОВ В РФ	114
<i>Руденко А.А., Носырев Г.М., Трошкина И.Д., Данилейко В.В., Бардыш А.В., Ванин И.А.</i> ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ ПО ДОБЫЧЕ И ИЗВЛЕЧЕНИЮ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СПВ УРАНА.....	119



<i>Русакова А.-М., Машковцев Г.А.</i> ПОЛМОСТУНДРОВСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ГРАНИТНЫХ ПЕГМАТИТОВ (ЛОВОЗЕРСКИЙ РАЙОН МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ)	123
<i>Соловьев А.С., Просекин А.С., Алгебраистова Н.К.</i> МЕСТОРОЖДЕНИЕ БЕРИЛЛИЯ УЕНЧ В ЗАПАДНОЙ МОНГОЛИИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ И ПОЛУЧЕНИЯ КОНЦЕНТРАТА.....	128
<i>Сычева Н.А., Кыджды М.В., Жукова В.Е., Шувалова Ю.Н.</i> МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОТИТАНИСТЫХ РУД, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИХ ОБОГАТИМОСТЬ.....	138
<i>Трошкина И.Д., Гакиев А.Л., Штейнберг М.Г.</i> СОРБЦИЯ РЕНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ КОНЦЕНТРАТА КОНДЕНСАЦИИ ФУМАРОЛЬНЫХ ГАЗОВ	145
<i>Тужилин А.С., Балмаев Б.Г., Ветчинкина Т.Н., Заблоцкая Ю.В.</i> ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ С ПОЛУЧЕНИЕМ КОАГУЛЯНТОВ..	148
<i>Турамурастов И.Б.</i> К ВОПРОСУ ПОИСКОВ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ЛАНДШАФТНЫХ УСЛОВИЯХ УЗБЕКИСТАНА.....	150
<i>Турсунметов Р.А., Гафуров Т.А., Ибрагимов А.С., Тё В.С., Хасанбаев Х.Ф.</i> РОЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОСТОЧНО-КЫЗЫЛКУМСКОМ АРТЕЗИАНСКОМ БАССЕЙНЕ.....	173
<i>Цыпленко М.М.</i> ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОКИСЛЕННЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕВЕРНОЕ (ЭЛЬКОНСКИЙ УРАНОВОРУДНЫЙ РАЙОН).....	177
<i>Читалин А.Ф.</i> РОЛЬ СТРУКТУРНОЙ ГЕОЛОГИИ В ПОИСКАХ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ	180
<i>Юрасова О.В., Скуратова Е.А., Королева Е.О.</i> ЭКСТРАКЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ ИЗ РАСТВОРОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ	192

РЕШЕНИЕ КОНФЕРЕНЦИИ

21–22 ноября 2023 г. в ФГБУ «ВИМС» состоялась Третья научно-практическая конференция «МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА МЕТАЛЛОВ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ. ОСВОЕНИЕ, ВОСПРОИЗВОДСТВО, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ».

В работе конференции приняли участие более 400 специалистов геологоразведочной отрасли из Российской Федерации, в том числе подведомственных организаций Роснедр, организаций, входящих в состав Ассоциации производителей и потребителей редких и редкоземельных металлов, коммерческих компаний, Российской академии наук, Минобрнауки РФ и др. Благодаря активному участию зарубежных коллег из Республики Беларусь, Республики Казахстан, Республики Узбекистан, Монголии конференция приобрела статус международной.

В течение двух дней было заслушано и обсуждено 60 устных и 17 стендовых докладов.

Доклады были посвящены: проблемам развития проектов освоения и ключевым направлениям развития внутреннего рынка потребления редких металлов, инновационным технологиям, внедряемым в том числе при поисках скрытых месторождений дефицитных полезных ископаемых, вопросам лабораторно-аналитического и технологического обеспечения геологоразведочных работ на стратегическое сырье.

21 ноября в рамках открытия конференции с приветственным словом к участникам обратились руководитель Федерального агентства по недропользованию Евгений Игнатьевич Петров, директор ГУ «Институт минерального сырья» Турамуратов Ильхомбай Бекчанович (Республика Узбекистан), академик РАН, академик-секретарь отделения наук о Земле РАН Николай Стефанович Бортников, президент Российского геологического общества Григорий Анатольевич Машковцев.

В своем приветственном слове Е.И. Петров отметил, что в стране происходит переход промышленности на новый технологический уклад и развитие высокотехнологичных отраслей, требующих активной подготовки запасов стратегических металлов. Он также указал на острую востребованность высокоэффективных технологий переработки минерального сырья и на важную роль ФГБУ «ВИМС» в качестве ведущей технологической площадки.

И.Б. Турамуратов отметил важность взаимодействия специалистов двух стран при разработке новых способов поисков и освоения месторождений высокотехнологичных металлов.

Академик РАН Н.С. Бортников в своем выступлении указал на необходимость развития минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых. Он отметил, что использование инновационных подходов, новых геофизических и геохимических методов при геологическом изучении территории страны позволит получать результаты, которые будут служить фундаментальной основой для совершенствования критериев прогноза и поисков месторождений.

В приветственном слове Г.А. Машковцев отметил, что в РФ имеется значительный сырьевой потенциал. Он также указал на необходимость создания и эффективного использования прогнозно-поисковых комплексов методов при поисках скрытых и открытых месторождений.

В ходе *пленарной сессии* А.А. Гермаханов, заместитель руководителя Федерального агентства по недропользованию, представил доклад об основных направлениях работ, которые выполняют подведомственные организации Роснедр для развития минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых.



В докладе заместителя директора Департамента государственной политики и регулирования в области геологии и недропользования Министерства природных ресурсов и экологии РФ А.В. Темнова «Стратегия для «стратегов»: цели, меры, итоги» были рассмотрены пути обеспечения технологического и сырьевого суверенитетов Российской Федерации.

Об особой роли стратегических металлов в развитии промышленности страны, а также о формировании спроса на стратегические виды минерального сырья и возможной государственной поддержке на различных стадиях его переработки было рассказано в докладе представителей Минпромторга России В.Л. Демидова, С.И. Гришаева «Формирование спроса на стратегическое минеральное сырье на основе производственно-технологических цепочек полного цикла и балансов производства-потребления».

Генеральный директор ФГБУ «ВИМС» О.В. Казанов в докладе «Сырьевое обеспечение высокотехнологичных отраслей экономики» рассмотрел основные направления и пути воспроизводства минерально-сырьевой базы стратегического сырья, необходимого для успешного функционирования высокотехнологичной экономики России. Определил роль технологической оценки минерального сырья в процессе освоения месторождений.

О роли академической науки в условиях негосударственной принадлежности месторождений и проектах по освоению месторождений, созданных организациями КНЦ РАН совместно с коммерческими предприятиями, рассказали в своем докладе «Роль и место академической науки в обеспечении российской промышленности стратегическим сырьем» член-корр. РАН И.Г. Тананаев и академик РАН С.В. Кривовичев (ФИЦ КНЦ РАН).

Председатель Ассоциации РМ и РЗМ Р.Р. Димухамедов в докладе «Развитие редкометалльной отрасли. Проблемы добычи и переработки» рассмотрел направления развития редкометалльной отрасли в мире, остановился на страновых приоритетах, а также инструментах развития отраслей, рассказал о редкометалльных проектах РФ, проблемах их развития и выхода из них.

Планы Госкорпорации «Росатом» по развитию литейной промышленности были представлены в докладе И.Л. Демидова (ООО «Полярный литий»).

Новым направлениям использования благородных металлов в сфере инновационных технологий был посвящен доклад А.И. Иванова, Е.А. Наумова, А.И. Черных (ФГБУ «ЦНИГРИ»).

Проблемы обеспечения металлургического комплекса марганцем, хромом, титаном были отражены в докладе академика РАН Л.И. Леонтьева.

На сессии «Перспективные проекты разведки, добычи и глубокой переработки» были заслушаны доклады, посвященные проблемам освоения редкометалльных месторождений, а также созданию и развитию производств продукции на основе стратегических металлов.

Открыл работу сессии Е.В. Мойланен, представитель ООО «Геотехнологии» – партнера-организатора конференции. В своем приветственном слове он отметил историческую роль ВИМСа в создании геофизических методов, в том числе аэрогамма-спектрометрии, а также рассказал о достижениях компании ООО «Геотехнологии» в области совершенствования метода аэроэлектроразведки.

В.С. Кряжевым (ООО «Полярный литий») и Н.Т. Ворогушиным (УК «Сибирские минералы») были представлены доклады по освоению месторождений лития – Колмозерского, Полмостундровского, Завитинского. Рассмотрены уже выполненные,

а также планируемые работы, предложены пути, способствующие ускорению начала добычи лития в РФ и повышению ее эффективности. Докладчиками О.Н. Жулановым, Е.М. Василевским (Ловозерский ГОК) были приведены планы по дальнейшему развитию Ловозерского ГОКа. О перспективах развития сырьевой базы редких металлов в Республике Узбекистан рассказал представитель ГУ «Институт минеральных ресурсов» М.Ш. Ахмедов.

О потребностях в редких металлах при производстве литиевых аккумуляторных батарей было рассказано в докладе представителя Ассоциации «РУСБАТ» Д.С. Тищенко. Докладчик также обратил внимание участников конференции на отсутствие законодательной базы и стандартов, необходимых при производстве литиевых источников тока.

Информация о развитии возможных направлений использования редких металлов в различных отраслях промышленности и пути обеспечения минеральным сырьем таких производств была представлена в докладах А.М. Зарганаева (ООО «Лаборатория инновационных технологий»), Е.Г. Полякова (ГК «Русредмет»), С.С. Шумкина (АО «НПП «Исток» им. Шокина», А.В. Сапегина (ООО «РусатомМеталлТех»).

Работа сессии «Перспективы выявления и освоения месторождений металлов высоких технологий» была открыта докладом В.А. Петрова и др. (ИГЕМ РАН), в котором было рассказано об особенностях современных прогнозно-минерагенических исследований на дефицитные виды стратегического минерального сырья, о внедрении в практику эффективных методов прогноза, поисков и оценки месторождений, которые основаны на ГИС-моделировании и нейросетевых технологиях.

В докладе Л.Н. Морозовой и др. (ФГБУ «ВИМС», ГИ КНЦ РАН, ИГД РАН) был сделан обзор месторождений Кольского редкометалльного пояса, содержащих в качестве основных и попутных стратегические металлы (бериллий, ниобий, тантал, литий). О роли россыпных месторождений и их преимуществах в обеспечении промышленности РФ стратегическими видами минерального сырья рассказал в своем докладе А.В. Лаломов (ИГЕМ РАН). О рудоформирующем значении древних инфильтрационных гипергенных процессов, их связи с концентрациями рения и скандия показано в докладе П.А. Игнатова и др. (МГРИ). В докладе коллег из Республики Узбекистан Р.А. Турсунметова и др. (ГУ «Институт ГИДРОГИНГЕО») были раскрыты закономерности миграции радионуклидов из ураноносных зон при их отработке.

Данные об особенностях формирования и перспективах освоения урановых объектов различных генетических типов были представлены в докладах А.В. Сашенко и др. (ФГБУ «ВИМС»), Д.А. Прохорова и др. (ФГБУ «ВИМС»), М.М. Цыпленко (НИ ТПУ). О поисковых критериях на литиеносные пегматиты, о перспективных объектах литиевого сырья было рассказано в докладах Д.С. Ключарева (ФГБУ «ИМГРЭ»), Е.Д. Михеевой и др. (ФГБУ «ВИМС»). В докладе И.Л. Махоткина (ФГБУ «ВИМС») были представлены данные о критериях выделения крупнотоннажных редкометалльно-вольфрамовых месторождений. В докладе А.В. Волкова (ИГЕМ РАН) на основе сравнительного анализа Печальнинского рудного поля (северо-восток России) с известными мировыми объектами в щелочных вулканитах показана возможность создания большеобъемного источника редких элементов.

Значительный перечень сообщений был посвящен созданию технологий добычи и переработки руд металлов высоких технологий. С обзорным докладом о выборе рациональных технологий для переработки существующих в РФ источников редкоземельного сырья выступил представитель РХТУ им. Д.И. Менделеева С.И. Степанов.

Вопросы, касающиеся результатов исследования вещественного состава, а также создания технологий переработки литиевого сырья, были рассмотрены в докладах



Ю.М. Астаховой и др. (ФГБУ «ВИМС»), Д.В. Наумова и др. (ФГБУ «ВИМС»), А.Г. Касикова и др. (ИХТРЭМС КНЦ РАН).

Возможные способы переработки нетрадиционных источников минерального сырья с извлечением из них редких, цветных металлов, урана были представлены в докладах С.Б. Короткова и др. (ООО «Газпроминвест» и коллег из Республики Узбекистан И.М. Алматова, Р.Б. Усенова (ГУ «ИМР»)).

О разработке усовершенствованной технологической схемы получения фторидных солей циркония и гафния из концентратов АО «ТГОК «Ильменит» и АО «Ковдорский ГОК» было рассказано в докладе Е.С. Копарулиной и др. (АО Чепецкий механический завод).

Специалисты КОО «ВАБК» из Монголии А.С. Просекин и др. представили доклад о возможной технологии получения бериллиевого концентрата из руды монгольского месторождения Уэнч, освоение которого происходит в рамках проекта с российским участием.

Особенности вещественного состава и их влияние на процессы обогащения высокотитанистых руд были рассмотрены в докладе Н.А. Сычевой и др. (ФГБУ «ВИМС»).

О схеме получения комплексных ниобиевых ферросплавов, альтернативной современному производству феррониобия, рассказали специалисты ИМЕТ УрО РАН А.В. Сычев и др.

Одной из важнейших проблем современной геологии – *поискам скрытых месторождений* – была посвящена спецсессия с одноименным названием, организованная во второй день работы конференции. На сессии были рассмотрены возможности использования инновационных методов и оборудования при поисках стратегических видов минерального сырья.

Работу спецсессии открыл докладом «К вопросу поисков скрытого оруденения в различных горно-геологических и ландшафтных условиях Узбекистана» И.Б. Турамуратов, директор ГУ «Институт минеральных ресурсов» (Республика Узбекистан). В докладе он рассказал об особенностях размещения скрытых месторождений Республики Узбекистан и необходимом для их обнаружения комплексе методов.

С докладом о роли аэрогеофизики при поисках месторождений дефицитных полезных ископаемых в Африке и Восточной Сибири выступил представитель партнера-организатора конференции ООО «Геотехнологии» В.М. Керцман.

Современные аэрогеофизические технологии и их роль в повышении эффективности геологоразведочных работ всех стадий на ТПИ были представлены в докладе А.А. Трусова и др. АО «ГНПП «Аэрогеофизика» – партнера-организатора конференции.

Возможности беспилотной электроразведки, оборудование, методика работ на конкретных объектах и преимущества данного метода были представлены в докладе К.М. Анташук и др. (ФГБУ «ВСЕГЕИ», ПАО «Полюс», ООО «АЛПОМ»).

О применении геофизических методов при поисках скрытых месторождений урана и марганца рассказала в своем докладе А.К. Ржевская и др. (ФГБУ «ВИМС»). Роль структурного прогноза в комплексе с геофизическими и геохимическими данными при поисках скрытого оруденения была отражена в докладе А.Ф. Читалина (ООО «ИГТ»).

Геохимическим и минералогическим методам прогноза и поисков месторождений ТПИ были посвящены доклады следующих специалистов: В.И. Леонтьева и др. (ФГБУ «ВСЕГЕИ»), М.В. Морозова и др. (АО «Полиметалл УК», ФГБУ «ВИМС»), А.Г. Пилицина, А.А. Кременецкого (ФГБУ «ИМГРЭ»), А.Г. Марченко (ООО «Теллур Северо-Восток»), А.В. Саранчина и др. (ФГБУ «ВИМС»), С.И. Красоткина и др. (ЗАО КЦ «Росгеофизика»), С.Г. Кряжева и др. (ФГБУ «ЦНИГРИ»), А.И. Несмеяновой (ФГБУ «ВИМС»), Е.Г. Еременко (ФГБУ «ВИМС»).

Отдельно следует отметить работу круглого стола, посвященного проблемам прогнозирования и регулирования производства и потребления отечественной промышленностью стратегических видов минерального сырья, которая вызвала живейший интерес участников и слушателей конференции. Было заслушано 4 доклада и обсуждены проблемы формирования мирового рынка металлов высоких технологий, перспективы производства и потребления продукции на основе стратегических видов сырья.

Заседание круглого стола открыл доклад А.М. Лаптевой (ФГБУ «ВИМС»), в котором автор представила прогнозы баланса спроса и предложения как обоснование целесообразности развития добычных проектов.

О тенденциях мирового рынка редких металлов в первом полугодии 2023 года рассказал в своем докладе представитель ООО Аналитическая группа «Металлургические исследования» (MetalResearch) Г.В. Гончаров. Данные о реализации проектов производства редкоземельных металлов, их структуре и динамике потребления в мире и в России были представлены в докладе И.М. Петрова (ООО «Исследовательская группа «Инфолайн»). Концепция создания российского бериллиевого производства была изложена в докладе А.Н. Дьяченко (МИРЭА – Российский технологический университет).

Во многих представленных на конференции сообщениях отмечалось, что сырьевое обеспечение высокотехнологичных отраслей экономики требует тщательного анализа перспективных потребностей промышленности по всем стратегическим видам минеральных ресурсов. Следует целенаправленно готовить к освоению объекты стратегических видов сырья с заданными потребителем технологическими свойствами, а также разрабатывать технологии переработки минерального сырья, включающие стадии глубокой переработки. Новая высокотехнологичная экономика должна опираться на производственные цепочки, которые необходимо выстроить от руды до промышленного потребителя и государственных закупок.

По итогам конференции были предложены следующие рекомендации:

- 1) Одним из основных направлений развития редкометалльной отрасли, исходя из объективно обусловленной низкой себестоимости импортного сырья и стратегической важности собственных добычных проектов по РМ и РЗМ, а также их глубокой переработки, считать применение защитных мер, включая повышение ввозных пошлин и квотирование для первоочередного приобретения РМ- и РЗМ-продукции российского производства как гражданскими отраслями промышленности, так и ОПК. Применение таких мер должно осуществляться с учетом объема собственных производств в соотношении с внутренними потребностями.
- 2) Рекомендовать Минпромторгу России в целях создания гарантированного рынка сбыта продукции (соединений РМ и РЗМ, сплавов на их основе, конечных изделий с использованием РМ и РЗМ) предусмотреть государственное регулирование в форме введения требований о локализации продукции (в зависимости от наличия проблем со сбытом российского продукта по конкретному виду сырья в стадиях технологической цепочки «от руды до высокотехнологичных изделий»).
- 3) Принять во внимание, что для достижения желаемого эффекта применения защитных мер необходимо их сочетание с субсидированием цены реализации, которое может быть установлено посредством принятия нового постановления Правительства Российской Федерации для отрасли РМ и РЗМ.
- 4) В настоящее время планирование развития отрасли РМ и РЗМ осуществляется только по показателям отдельных проектов «дорожной карты». Отсутствие исчерпывающей информации об импортируемых видах РМ и РЗМ и их объемах,

необходимых для отраслей российской экономики, затрудняет выполнение задачи планирования сквозной цепочки добывающих и перерабатывающих производств. Поскольку многие меры поддержки имеют «отложенный эффект» и находятся в тесной взаимосвязи с достижением объемов выпуска редкометалльных материалов/изделий, позволяющих покрывать внутренний спрос, необходимо составление консолидированного прогноза по потребности в редких металлах и их предложению.

- 5) Необходима разработка высокоэффективных технологий по переработке стратегических видов сырья, создание опытных полигонов для опробования новых технологий. Рекомендовать Минобрнауки РФ, Минприроды осуществлять приоритетное финансирование новых НИОКР, направленных на создание технологий глубокой переработки стратегических видов сырья.
- 6) Рекомендовать научным организациям, геологическим службам и горнодобывающей промышленности сконцентрировать внимание на месторождениях стратегического минерального сырья, которые могут быть освоены в короткие сроки и с минимальными затратами, в частности, на россыпях, корях выветривания и техногенных образованиях.
- 7) Для скорейшего обеспечения потребностей отечественной промышленности в наиболее востребованных редкоземельных металлах среднетяжелой группы (самарии гадолинии, тербии, диспрозии, эрбии и др.) ускорить освоение и разработку месторождений эвдиалита Кольского полуострова и Катугинского месторождения.
- 8) Считать важной задачей восстановление производства в Российской Федерации основных типов экстрагентов, необходимых для получения редких металлов требуемой чистоты.
- 9) Включить в перечень разрабатываемых технологий РЗМ получение индивидуальных металлов РЗЭ и сплавов РЗМ с другими металлами методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС процесс) на основе отечественных разработок, как самого процесса, так и уникального оборудования для его проведения.
- 10) В целях развития отечественного производства литий-ионных батарей планировать мероприятия по возможности организации замкнутого цикла с использованием полученных в стране материалов и утилизацией отработанных батарей.
- 11) Для замкнутого цикла обеспечить работающую законодательную базу и стандарты, охватывающие производство литиевых систем накопления энергии и эксплуатацию в каждом применении.
- 12) Для ускорения начала применения отечественного литья и других редких металлов необходимо стимулировать потребление произведенных в Российской Федерации по полному циклу производства литий-ионных аккумуляторов, что даст возможность существующим производителям увеличить долю отечественной продукции на рынке, а сборочным производствам – мотивацию для скорейшего завершения процесса локализации их продукции.
- 13) Для продвижения государственных интересов России и интересов российской горнорудной науки и промышленности, считать целесообразным в рамках выделенных стратегических сырьевых направлений формирование мер государственной поддержки деятельности российских инвесторов как внутри страны, так и за её пределами. Поддержка должна распространяться на продвижение российских технологий, НИР и НИОКР, услуг и техники в

иностранных проектах.

- 14) Рекомендовать Минприроды, Минобрнауки, администрациям ГОКов, промышленных предприятий рассмотреть возможность организации целевой подготовки специалистов высшей квалификации из числа сотрудников действующих предприятий. Воссоздать при предприятиях колледжи, профтехучилища для подготовки технических и рабочих кадров, а при университетах и научно-исследовательских институтах – постоянно действующие курсы повышения квалификации.

Реализация предложенных рекомендаций будет способствовать оптимизации производства руд и концентратов стратегических металлов, формированию внутреннего спроса на стратегические ТПИ, в том числе редкие металлы, а также сбалансированному осуществлению государственной поддержки необходимых уровней производственных цепочек, действующих при создании высокотехнологичной продукции.

ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АКТАУ С ИЗВЛЕЧЕНИЕМ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Алматов И.М., Усенов Р.Б.

ГУ «Институт минеральных ресурсов», г. Ташкент, Республика Узбекистан

info@grniimr.uz

Ключевые слова: горючие сланцы, минералогия, полукокс, выщелачивание, серная кислота, ванадий, молибден, уран, золото.

Введение. Для переработки горючих сланцев известны действующие и приостановленные технологии, такие, как: установка Галотер и Петротер (Эстония), установка Энифит-280 и Энифит-140 (Эстония), установка Фушунь (Китайская Народная Республика), установка Кивитер (Эстония). Эти технологии на сегодняшний день работают. Опытные технологии: Юнион Б, Парахо и Тоско-2 (США), Альберта Тасиук (Австралия) [1–4]. Кроме США, в мире всего две страны, добывающие, по состоянию на начало 2010-х годов, сланцевый газ в коммерческих объёмах – Канада и Китай, в которых добывается около 30 млрд м³ и менее 1 млрд м³, соответственно. Доля сланцевого газа в общем объёме добычи в этих странах составляет 15 % и менее 1 %, соответственно [5–6] (рис. 1).

В Республике Узбекистан тоже имеются запасы горючих сланцев, которые, по данным [7], составляют более 47 млрд тонн. Надо отметить, что горючие сланцы республики отличаются содержанием металлов и требуют дополнительных исследований.

Результаты исследований и их обсуждение. Для проведения полного химического анализа горючих сланцев отобрана средняя проба месторождения Актау. Результаты полного химического анализа средней пробы горючих сланцев показаны в табл. 1.

Полученные результаты характеризуются содержанием: SiO₂ – 62,98 %, Fe_{общ.} – 5,64 % и резким преобладанием калия (K₂O – 1,42 %) над натрием Na₂O (0,97 %).

С целью определения содержания золота и серебра в горючих сланцах месторождения Актау проведен рациональный анализ. Результаты испытания представлены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты полного химического анализа горючих сланцев

№	Наименование компонентов	Содержание, %	№	Наименование компонентов	Содержание, %
1	SiO ₂	62,98	9	K ₂ O	1,42
2	Fe ₂ O ₃ общ.	5,64	10	P ₂ O ₅	1,00
3	TiO ₂	0,62	11	Сера сульф.	0,83
4	MnO	0,08	12	S _{общ.}	1,62
5	Al ₂ O ₃	14,9	13	ППП	23,47
6	CaO	7,76	14	Сумма	101,86
7	MgO	3,02	15	CO ₂	0,35
8	Na ₂ O	0,97	16	H ₂ O гигроск.	0,44

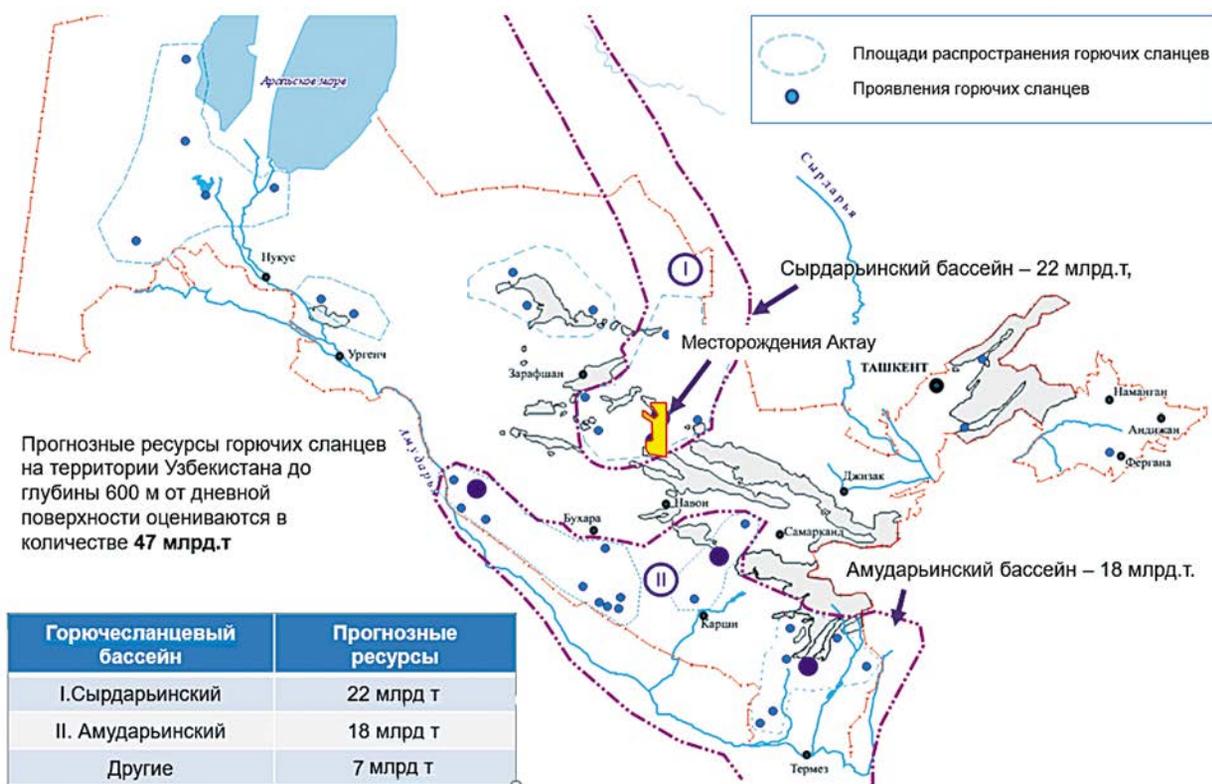


Рисунок 1. Карта расположения и запасов горючих сланцев

Таблица 2

Рациональный анализ горючих сланцев месторождения Актау

Форма нахождения благородных металлов и характер их связи с рудными минералами	Распределение металлов			
	Au		Ag	
	г/т	%	г/т	%
Au и Ag самородное, в сростках с другими минералами: хлориды, сульфаты, простые сульфиды серебра	0,1	28,57	0,32	17,58
Au и Ag, ассоциированные с минералами и хим. соединениями Sb и As (кроме арсенипирита и соединений 5–тивалентной Sb), сульфосоли Ag (цианируемые после щелочной обработки)	0,01	2,9	0,29	15,93
Au и Ag, связанные с кислоторастворимыми минералами, оксидами железа и марганца (карбонаты, оксиды и гидроксиды) (цианируемые после HCl – обработки)	0,04	11,43	0,23	12,64
Au и Ag тонковкрапленные в сульфидах (пирите и арсенипирите), цианируемые после HNO ₃ – обработки	0,01	2,86	0,09	4,95
Au и Ag, цианируемые после окислительного обжига	0,09	25,71	0,69	37,91
Au и Ag в кварце, алюмосиликатах и др. кислотонерастворимых минералах	0,1	28,57	0,2	10,99
Итого в пробе:	0,35	100	1,82	100

По данным анализа, самородное золото и серебро составляет 28,57 % и 17,58 %.

Для получения трёх фракций – жидкой, газовой и твердой (полукокк) – проводилось термическое разложение без доступа кислорода (пиролиз). Выход жидкой фазы составил 13,0 % при классе крупности -10+0 мм. Выход газа составил 7,4 %. Выход твердого остатка (зола) составляет 79,6 %.

Один из наиболее перспективных и эффективных способов извлечения молибдена и ванадия – использование сернокислотного раствора. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты выщелачивания при оптимальном режиме золы горючих сланцев месторождения Актау

Кислота	Концентрация металлов в растворе, г/л		Извлечение в раствор, %	
	Mo	V	Mo	V
H ₂ SO ₄ – 160 г/л	4,9	52,4	93,1	81,2

Как видно из табл. 3, в результате выщелачивания полукокса горючих сланцев месторождения Актау извлечение в сернокислотный раствор составило: молибдена 93,1 % и ванадия 81,2 % соответственно.

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований можно считать, что переработка горючих сланцев позволит получать не только смолу, пригодную для дальнейшего получения нефтепродуктов, но молибден и ванадий из полукокса.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Андрианов В. Нетрадиционная нефть: кто разорвёт порочный круг // Нефтегазовая Вертикаль. 2014. № 12. С. 44–49.
- 2) Стрижакова Ю.А., Усова Т.В. Экологические проблемы сланцеперерабатывающего производства // Химия твердого топлива. 2007. № 3. С. 53–59.
- 3) Андреев В. Быть новому заводу «Enefit 280» или не быть // Северное побережье. 2020. С. 23–29.
- 4) Mining and use of oil shale to be based on interests of state // Ministry of the Environment of Estonia. 2008. P. 96–101.
- 5) Иванов Н.А. Сланцевая Америка: энергетическая политика США и освоение нетрадиционных нефтегазовых ресурсов / М.: Магистр. 2014. С. 304.
- 6) U.S. Energy Information Administration: North America leads the world in production of shale gas. Интернет-ресурс: www.eia.gov.
- 7) Алматов И.М., Усенов Р.Б., Махмарежабов Д.Б. Пути комплексной переработки горючих сланцев месторождения Актау (Узбекистан) // Обогащение руд. 2023. № 6. С. 28–32.

СОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА СУЛЬФАТНЫХ ДЕСОРБАТОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТ ТОРИЯ И УРАНА

*Андреева С.И. – 1, Татарников А.В. – 1, Мешков Е.Ю. – 1,
Трошкина И.Д. – 2, Соловьев А.А. – 1
1 – АО «ВНИПИпромтехнологии», Москва,
2 – ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д.И. Менделеева», Москва*

Попутное извлечение редкоземельных элементов (РЗЭ) на действующих предприятиях скважинного подземного выщелачивания (СПВ) урана с развитой инфраструктурой является одним из перспективных направлений наращивания добычи РЗЭ в РФ [1–3].

Технологии извлечения РЗЭ из растворов СПВ урана разработаны и постоянно совершенствуются. При этом они не внедряются в производство из-за низких

содержаний РЗЭ в продуктивных растворах, а также низких цен на РЗЭ. Еще одна причина, сдерживающая внедрение технологий извлечения РЗЭ из растворов СПВ урана – необходимость дезактивации и очистки продуктов и полупродуктов. Очистка РЗЭ от радиоактивных элементов является актуальной задачей.

Невысокое содержание РЗЭ в продуктивных растворах обуславливает использование сорбционного метода извлечения. В качестве ионообменных материалов для извлечения и концентрирования РЗЭ из растворов сложного солевого состава обосновано применение различных по своей структуре сульфокатионитов [4, 5].

В данной работе использовали катионит Lewatit K2629, который по данным предварительных опытов показал положительные сорбционные показатели в отношении РЗЭ. При сорбционном извлечении РЗЭ из растворов после сорбции урана на производственной площадке АО «Хиагда» с помощью используемого сульфокатионита получен сульфатный десорбат, содержание тория и урана в котором не позволяет получить товарный продукт с допустимой удельной активностью для дальнейшей переработки. В связи с этим рассматривается возможность очистки сульфатных десорбатов РЗЭ от тория и урана сорбционным методом с помощью хелатного ионита Purolite GS176. Состав полученного элюата РЗЭ представлен в табл. 1.

Сорбцию урана и тория проводили в динамических условиях до достижения равенства концентраций урана и тория в исходном растворе и в маточнике сорбции. Раствор подавали в нижнюю часть колонны через неподвижный слой ионита с расходом $50 \text{ см}^3/\text{ч}$ при объеме ионита в колонне – 25 см^3 .

Полученные данные по сорбции урана и тория из элюатов РЗЭ показали, что РЗЭ практически не сорбируются из раствора (рис. 1).

Таблица 1

Состав исходного раствора (десорбата РЗЭ) для очистки от тория и урана

Содержание в растворе, г/дм ³					
Th	U	∑РЗЭ	∑(Dy–Lu)	H ₂ SO ₄	(NH ₄) ₂ SO ₄
0,145	0,460	4,971	0,192	28,6	130,0

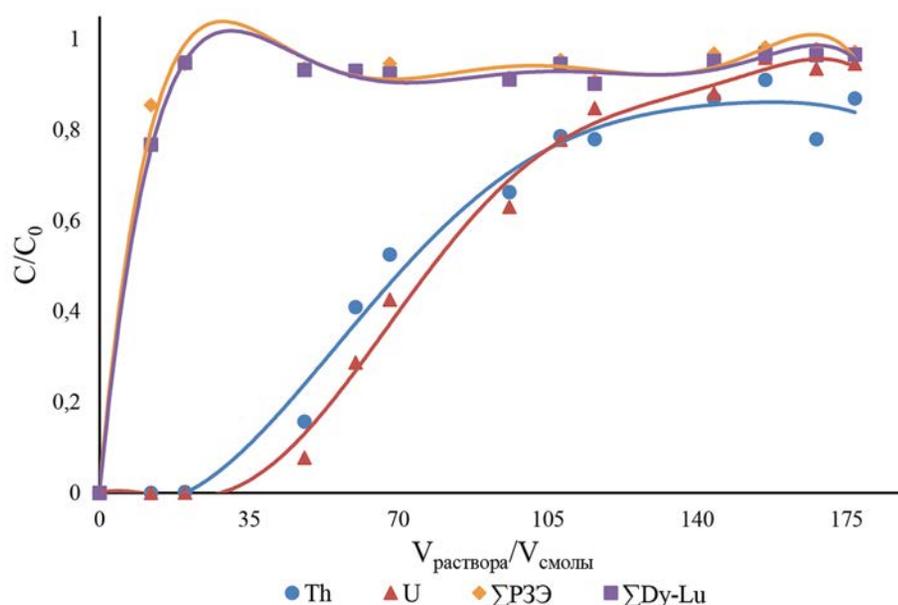


Рисунок 1. Выходная кривая сорбции Purolite GS176

Торий и уран извлекаются ионом GS176 из сульфатного десорбата без предварительной подготовки раствора до остаточного содержания в маточнике сорбции (при $V_{\text{раствора}}/V_{\text{смоли}} = 12$) менее $0,1 \text{ мг/дм}^3$ по торию и менее $0,4 \text{ мг/дм}^3$ по урану. В табл. 2 приведены содержания элементов в насыщенном ионите и значения кинетического коэффициента сорбции для тория и урана в режиме полного насыщения.

Полученные результаты подтверждают возможность использования ионообменной смолы Purolite GS176 для очистки десорбатов от урана и тория, при этом степень извлечения РЗЭ в ионит составляла $0,08 \%$ в режиме полного насыщения (табл. 3). Стоит отметить, что ионит при подборе оптимальных условий, может быть использован для разделения тяжелой и легкой групп РЗЭ.

Десорбцию урана и тория проводили в динамических условиях; скорость пропуска раствора, подаваемого в нижнюю часть колонны через неподвижный слой ионита, составляла $25 \text{ см}^3/\text{ч}$ при объеме ионита в колонне – 25 см^3 . Соотношение высоты сорбционной колонны к ее диаметру (h:d) – 10:1. Выходные кривые элюирования урана и тория приведены на рис. 2.

Высокое остаточное содержание урана в ионите после десорбции может быть связано с образованием его нерастворимых соединений в порах ионита при десорбции. Допускается возможность корректировки состава десорбирующего раствора и режима

Таблица 2

Некоторые показатели сорбции на анионите Purolite GS176 в режиме полного насыщения

Содержание в ионите, г/дм ³				Кинетический коэффициент сорбции (β), час	
Th	U	$\Sigma\text{РЗЭ}$	$\Sigma(\text{Dy-Lu})$	Th	U
12,5	36,0	0,685	0,038	0,14	0,14

Таблица 3

Содержание элементов в ионите Purolite GS176 после десорбции

Содержание в ионите, г/дм ³		
Th	U	$\Sigma\text{РЗЭ}$
0,091	3,00	<0,045

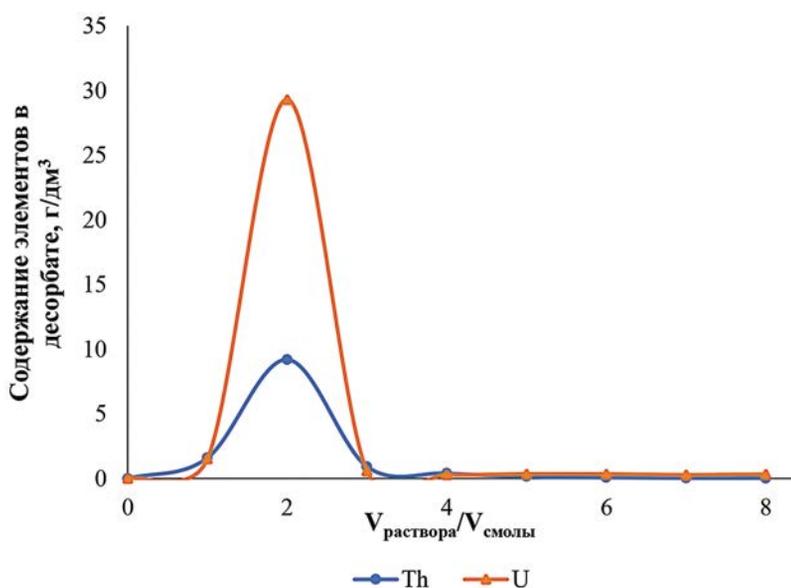


Рисунок 2. Выходная кривая элюирования урана и тория

промывки ионита для предотвращения образования нерастворимых соединений в десорбате и в фазе ионита.

Проведен повторный опыт сорбции в режиме «до проскока» содержаний тория и урана в растворе после сорбции (табл. 4). Сорбцию урана и тория проводили в динамических условиях: скорость пропускания раствора, подаваемого в нижнюю часть колонны через неподвижный слой ионита, составляла $150 \text{ см}^3/\text{ч}$ при объеме ионита в колонне – 75 см^3 (при $V_{\text{раствора}}/V_{\text{смоля}} = 27$).

Полученные данные показали, что при выбранных условиях возможно достичь извлечения из сульфатного десорбата РЗЭ не ниже 99,93 % для тория и не менее 99,91 % для урана в режиме «до проскока» содержаний тория и урана в растворе

Таблица 4

Показатели сорбции Purolite GS176 в режиме «до проскока»

Содержание в растворе после сорбции, мг/дм ³			Содержание в насыщенном ионите, мг/дм ³		
Th	U	∑РЗЭ	Th	U	∑РЗЭ
1,2	<1,0	5433,8	1465	2457	3772

после сорбции. Стоит отметить, что потери целевых РЗЭ на этапе сорбционной очистки десорбата при этом минимальны.

Выводы. В работе показана возможность использования хелатного ионита Purolite GS176 для очистки сульфатных десорбатов РЗЭ от тория и урана. Выбранный ионит обладает уникальными свойствами: высоким сродством к торью и урану и низким – к РЗЭ. Использование выбранного ионита позволяет извлекать торий и уран из десорбата сульфокатионита без предварительной подготовки раствора и при минимальном соизвлечении РЗЭ.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Соловьев А.А., Мешков Е.Ю., Бобыренко Н.А., Парыгин И.А. Определение возможности сорбционного концентрирования скандия и редкоземельных металлов из возвратных растворов скважинного подземного выщелачивания урана // Цветные металлы. 2018. № 7. С. 6–12.
- 2) Мешков Е.Ю., Красноперова Ю.Г., Соловьев А.А. Перспективы попутного с ураном извлечения редкоземельных элементов из технологических растворов скважинного подземного выщелачивания // Горный журнал. 2022. № 4. С. 25–34.
- 3) Санакулов К.С., Петухов О.Ф., Шарафутдинов У.З. Редкие металлы – инновационный ресурс НГМК // Горный вестник Узбекистана. 2018. № 4. С. 57–61.
- 4) Петухов О.Ф., Рузиев Б.Т., Шарафутдинов У.З. Извлечение редкоземельных элементов из растворов подземного выщелачивания урана // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 1. С. 58–67.
- 5) Гедгагов Э.И., Тарасов А.В., Гиганов В.Г., Лунькова М.А. Разработка инновационной сорбционно-экстракционной технологии получения соединений РЗМ // Цветные металлы. 2017. № 8. С. 50–55.

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ ЛИТИЕВЫХ РУД

*Астахова Ю.М., Жукова В.Е., Рассулов В.А, Якушина О.А.
ФГБУ «ВИМС», Москва*

Литий – стратегический элемент 21 века, легкий металл, обладающий уникальными свойствами и востребованный в мире, поскольку применяется в широком спектре отраслей промышленности, в том числе в энергетике, электронике, металлургии и медицине. В энергетике литий используется для производства литий-ионных аккумуляторов, которые применяются в электромобилях, смартфонах, ноутбуках и других устройствах. В последние годы спрос на литий резко возрос, что обусловлено бурным развитием электротранспорта.

Россия обладает значительными запасами лития, на ее долю приходится 10 % мировых запасов. Основные запасы сосредоточены в сподуменовых пегматитах, которые встречаются в Восточной Сибири и в Забайкальском крае. Развитие литиевой индустрии в России имеет важное стратегическое значение. Оно позволит обеспечить страну необходимыми ресурсами для производства литий-ионных аккумуляторов и других изделий, в которых используется литий [1].

В настоящее время в России ведется разработка технологий добычи и переработки лития. В частности, разрабатываются проекты по добыче лития из рассолов, а также из пегматитов, но развитие литиевой индустрии РФ сталкивается с проблемами, такими, как недостаточно развитая инфраструктура для работы на удаленных объектах и отсутствие готовых технологий переработки литийсодержащего сырья.

Всесторонняя и достоверная информация о составе и строении руд, в том числе и комплексных литийсодержащих, включающая гранулярный состав, морфометрические характеристики, степень вторичных изменений полезных минералов, форму нахождения и выделения не только главных, но и сопутствующих элементов (Nb, Ta, Be), позволяет прогнозировать поведение руд в технологических процессах и оценить качество ожидаемых продуктов. В связи с этим резко возрастает роль оценки качества литиевых руд, которая должна проводиться на всех стадиях их геологического изучения и освоения. Решение этих задач осуществляется посредством изучения руд и горных пород с литиевой минерализацией комплексом методов минералогического анализа. Методы, используемые для изучения литиевых руд, включают: оптическую микроскопию, рентгенографический, люминесцентный анализы, электронную микроскопию и др. [2, 3, 4, 5].

Комплексирование методов минералогического анализа позволяет получить необходимую и достоверную информацию о составе и свойствах руды, что, в свою очередь, позволит оценить и изучить ее особенности при геологоразведочных работах и прогнозировать поведение в технологических процессах.

Оптическая микроскопия – основной метод изучения текстурно-структурных признаков и качественного (полуколичественного) состава руд. У литиевых руд, связанных с пегматитами, наблюдается массивная, в отдельных случаях полосчатая, гнейсовидная текстуры. Структура руд преимущественно разнозернистая (от мелко- до крупнозернистой, реже гигантозернистой). Поэтому при оптико-петрографическом анализе нужно, по возможности, изготавливать шлифы большего размера (рис. 1 а, б); если величина стандартного шлифа 2,5 × 3 см, то масштаб шлифа из пегматитов должен быть больше хотя бы в 2 раза по сравнению со стандартными шлифами (рис. 1 в).

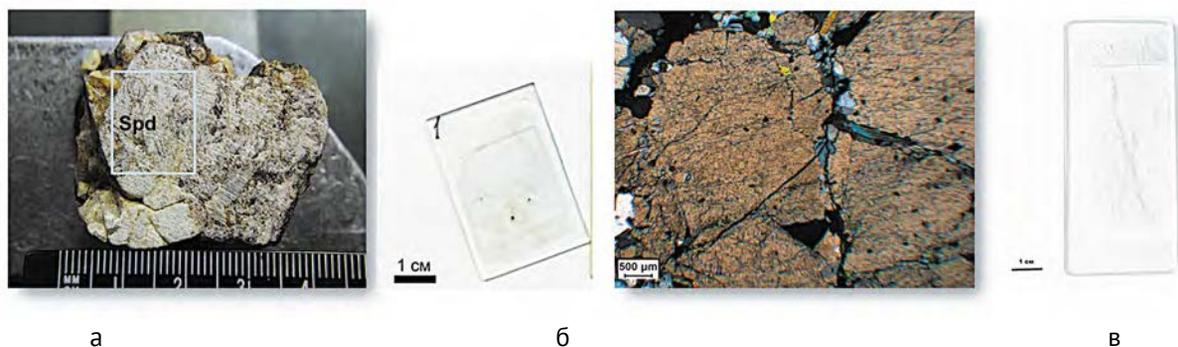


Рисунок 1. Фрагмент морфоструктурных особенностей сподумена; а, б – в обычном шлифе, без полных и видимых взаимоотношений (срастаний) с другими минералами; в – желательный размер шлифа

Методы оптической микроскопии позволяют определить морфоструктурные особенности и изменчивость внутреннего строения сподумена, главного литийсодержащего минерала пегматитов, с определением степени его неоднородности.

Сподумен чаще всего имеет размер от 0,1 мм до первых сантиметров. В рудах может быть представлен несколькими морфологическими разновидностями. Минерал подвержен деформациям: блочность, трещиноватость, обычно выполнен кварцем, слюдой, полевыми шпатами (рис. 2 а, б, в). Одновременно с практически неизменными кристаллами минерала присутствуют в различной степени преобразованные зерна (рис. 2 г). Неоднородность сподумена, обусловленная вторичными преобразованиями, приводит к потере минералом лития, что в свою очередь будет снижать качество конечных продуктов.

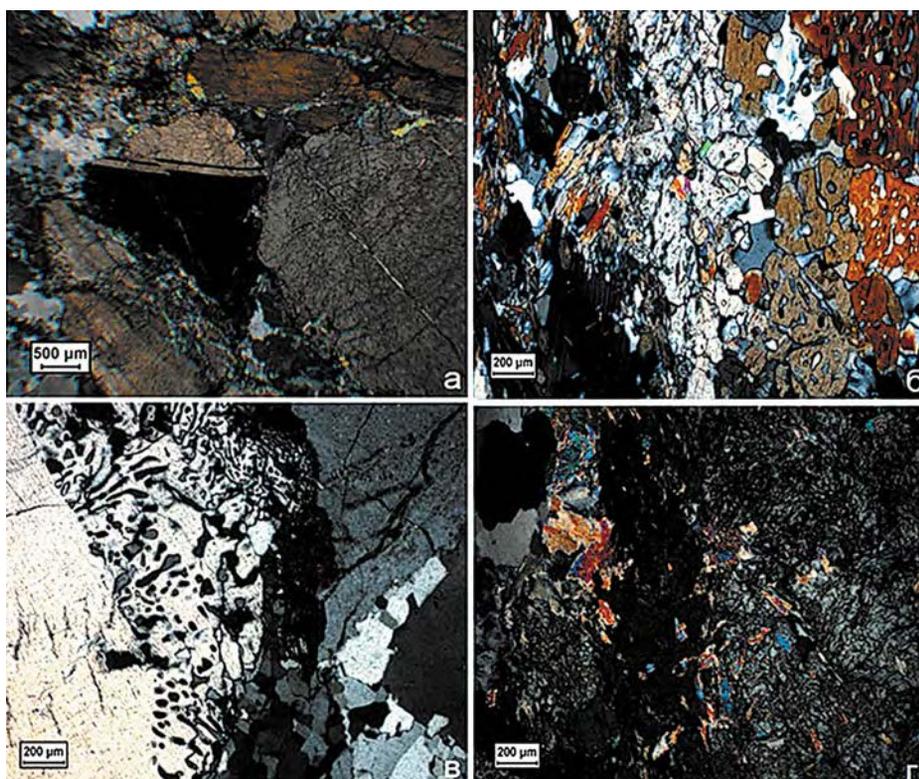


Рисунок 2. Структурные особенности сподумена. Проходящий свет, николи скрещены

Рентгенографический фазовый анализ позволяет определить главные рудные, а также породообразующие минералы как в отдельных образцах руды, так и в технологических пробах. Минеральный состав руд относительно прост. Наиболее характерны ассоциации сподумена из пегматитов с кварцем, микроклином, альбитом, мусковитом.

Акцессорные минералы представлены гранатами, апатитом, колумбит-танталитом, реже касситеритом, турмалином и другими минералами. При доминирующей роли кварца и полевых шпатов содержание сподумена может варьировать от первых процентов до 25 %.

Точная диагностика литийсодержащих слюд методами оптической микроскопии и рентгенографическим фазовым анализом затруднена, определение политипных модификаций алюмолититиевых слюд представляет собой сложную задачу, которая требует времени и специальной методики подготовки материала и анализа. Литийсодержащие слюды в основном принадлежат к сложной изоморфной системе.

Определение Li_2O в минералах и поминерального баланса этого компонента методически затруднено, поскольку определение содержания лития требует специальных методов анализа, требующих отбора мономинеральных литиевых минералов, масса навески которых должна быть не меньше 1 г.

Методами сканирующей электронной микроскопии можно определить особенности микростроения минеральных выделений, структурную и фазовую неоднородность, наличие микровключений, их элементный состав. Однако литий- и бериллийсодержащие минералы не могут быть изучены этими методами.

Для диагностики минералов лития используется люминесцентный метод, позволяющий экспрессно определять люминесцирующие минералы невооруженным глазом или с помощью стереоскопического микроскопа с использованием источника ультрафиолетового излучения. Минерал диагностируется путём сравнения цвета его свечения с цветами свечения «эталонных» образцов или по таблицам люминесцентных свойств минералов. За счет сильной розовой люминесценции двухвалентного марганца сподумен хорошо идентифицируется (рис. 3).

Минералогические особенности литиевых руд позволяют прогнозировать их поведение в технологических процессах и качество ожидаемых продуктов.

На первом этапе технологических испытаний оптико-минералогическим методом проводится подсчет раскрываемости зерен полезных минералов в дробленном

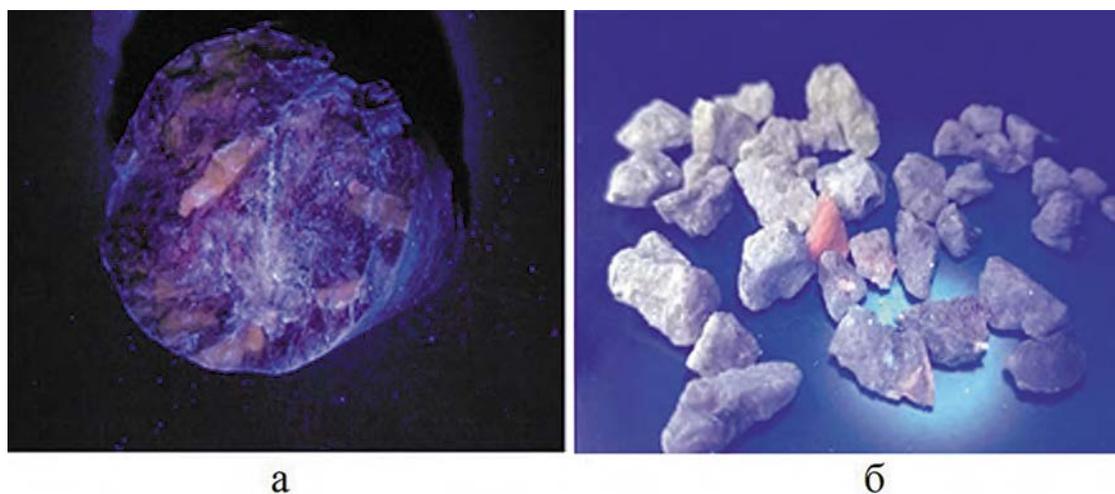


Рисунок 3. В ультрафиолетовом свете сподумен красный: а – в породе, б – дробленный материал

материале различных классов крупности более 0,074 мм (подсчет количества свободных зерен и сростков (богатые, рядовые, бедные) минералов и содержание нерудных минералов в выборке из 500 зерен (рис. 4).

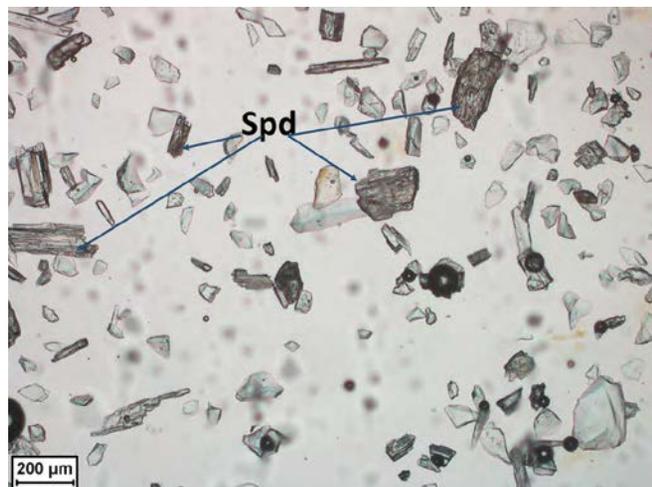


Рисунок 4. Характер раскрытия, морфоструктурные особенности сподумена в классе крупности $-0,074+0,044$ мм. Проходящий свет, николи параллельны

В продуктах ситового анализа литийсодержащих руд присутствуют внешне свободные зерна минералов, которые в действительности являются сростками, поэтому необходимо проанализировать такие «зерна» методами рентгенографического фазового анализа или изготовить искусственный препарат (прозрачный шлиф), материал тонких классов на предмет раскрываемости минералов можно изучать в иммерсионных препаратах с помощью поляризационного микроскопа и также контролировать рентгенографическим анализом (см. рис. 4).

Применение комплекса методов минералогического анализа позволяет получить информацию, необходимую для решения задач различной сложности на всех стадиях геологоразведочных работ.

Особенности состава и строения литийсодержащего сырья, в первую очередь литиевых пегматитов, которые в настоящее время рассматриваются в качестве основного источника для получения высокочистых соединений лития, в целом определяют перспективы их промышленного использования.

Авторы выражают благодарность научному руководителю д.г.-м.н. Ожогой Е.Г., а также Шуваловой Ю.Н., Кривошекову Н.Н. за всестороннюю помощь и поддержку при написании данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю., Ткачева Е.В. Сырьевой потенциал лития России // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 12. С. 7–16.
- 2) Ожогой Е.Г., Котова О.Б., Рогожин А.А. Прогнозная минералого-технологическая оценка труднообогатимых полезных ископаемых. Материалы международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья» (Плаксинские чтения – 2016). – Санкт-Петербург: Издательский дом «Руда и металлы», 2016. С. 8–10.
- 3) Ожогой Е.Г., Лихникевич Е.Г., Якушина О.А., Рогожин А.А. Определяющее значение минералогической информации при выборе технологий переработки // Современные тенденции

в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института «Уралмеханобр», Екатеринбург, 06–08 ноября 2019 года. – Екатеринбург: ОАО «Уралмеханобр», 2019. С. 151–154.

- 4) Лихникевич Е.Г., Ожогина Е.Г., Пермякова Н.А. Минералогический прогноз выбора технологий переработки редкометалльных руд // Разведка и охрана недр. – 2021. № 6. С. 56–60.
- 5) Астахова Ю.М., Жукова В.Е., Лихникевич Е.Г. и др. Методические подходы к минералогическому изучению литиевых руд при оценке их качества // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья. Материалы Международной конференции (Плаксинские чтения – 2023). М.: Издательство «Спутник +», 2023. С. 161–164.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ В РЕСПУБЛИКЕ УЗБЕКИСТАН

*Ахмедов М.Ш., Ежков Ю.Б., Холиёров А.Т.
Государственное учреждение «Институт минеральных ресурсов» (ИМР)
Министерство горнодобывающей промышленности и геологии
Республики Узбекистан*

Аннотация. Редкометалльная стратегия Республики Узбекистан предусматривает переоценку перспектив редкометалльных гранитофильных объектов и площадей, содержащих руды редких металлов (пегматиты, альбититы, грейзены), в особенности – ниобия, тантала, лития и бериллия.

Ключевые слова: Редкометалльная стратегия, ниобий, тантал, месторождение.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE RAW MATERIAL BASE OF RARE METALS IN THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

*Akhmedov M.Sh., Ezhkov Y.B., Holiyorov A.T.
“Institute of Mineral Resources” State establishment (IMR),
Ministry of mining industry and geology of the Republic of Uzbekistan*

Abstract. The rare metal strategy of the Republic of Uzbekistan provides for a reassessment of the prospects for rare metal granitophilic objects and areas containing rare metal ores (pegmatite, albitite, greisen), especially niobium, tantalum, lithium and beryllium.

Key words: Rare metal strategy, niobium, tantalum, deposit.

Стратегические виды природного минерального сырья составляют основу ведущих отраслей производства, обеспечивающих экономическую и оборонную безопасность любого государства. Особую роль в структуре этого сырья играют редкие металлы.

Речь идет о тех природных ресурсах, которые, во-первых, в той или иной стране недостаточны для удовлетворения производства и могут создать дорогостоящую зависимость от соответствующих импортных поставок в периоды чрезвычайных положений. Другой вариант – такое сырье отсутствует или не перерабатывается в стране в

количествах, достаточных в обычных ситуациях. И наконец, его резервы можно продать для пополнения бюджета государства в кризисных ситуациях. Перечень конкретных видов стратегического сырья не является постоянным и универсальным, он может широко варьировать в каждой стране в зависимости от экономических приоритетов, структуры производства, конъюнктуры мирового рынка и т. д. Например, в США в 1921 г. в него входило всего 28 видов металлов, руд и их концентратов, сегодня же он насчитывает более 115 наименований, в том числе 9 редких металлов.

Крупные запасы стратегических металлов созданы сейчас в странах Западной Европы: в Великобритании в резервах хранятся хром и марганец, в ФРГ – хром, ванадий, кобальт и другие металлы, список Франции включает 13 наименований. Даже практически безресурсная по минеральному сырью Япония имеет стратегические запасы меди, свинца, цинка, алюминия.

К редким металлам относят нерадиоактивные и неблагородные металлы, обычно с низкими содержаниями в породах. Они, за исключением редких земель, не образуют крупных промышленных скоплений, а рассеяны в рудах черных, цветных и благородных металлов. Но ценность редких металлов вне сомнения: германий, индий, тантал служат элементной базой опико- и микроэлектроники; галлий, скандий, гадолиний – самых мощных лазеров; неодим, самарий, диспрозий – нового класса постоянных магнитов; иттрий, лантан, стронций, висмут, таллий – активно разрабатываемых высокотемпературных сверхпроводников; цирконий, иттрий – новой конструкционной керамики; ниобий, литий, ванадий, бериллий, рений, скандий – авиационных и космических материалов; цирконий, гафний – атомной техники; литий, бериллий, ванадий – термоядерной энергетики. Многие из перечисленных элементов используют для легирования и модификации чугуна, стали, алюминия и других металлов.

Постоянное расширение сферы применения редких элементов обеспечивает экономию природных ресурсов, повышает качество продукции, наконец, снижает энергетические и материальные затраты. Так, незначительные добавки лития в электролит при промышленном получении алюминия приводят к большой экономии энергоресурсов, резко сокращают выбросы в атмосферу токсичного фтора. Не случайно, за два последних десятилетия, в высокоразвитых странах потребление ископаемого топлива, железа и ряда других традиционных видов сырья снизилось на 20–50 %, а расход редких металлов, напротив, в несколько раз увеличился.

Собственно же производство и потребление редких металлов в мире относительно невелико по объему: в десятках и тысячах т производятся цирконий, стронций, сурьма, ванадий, редкие земли, ниобий, кадмий, ртуть, в сотнях т – тантал, висмут, селен, остальные – в десятках т и даже в единицах. Поэтому довольно распространена точка зрения о нецелесообразности усилий по созданию и совершенствованию собственной редкометалльной сырьевой базы для столь малотоннажных видов сырья, которое в случае крайней необходимости можно было бы приобрести на мировом рынке. Однако эта позиция опровергается мировым опытом.

По мнению многих экспертов минерально-сырьевых бирж, анализ мировой конъюнктуры редкометалльных товаров показывает, что полагаться только на их импорт нецелесообразно, поскольку рынки их часто развиваются крайне нестабильно. Только за последние десять лет необычайно резкие всплески и (или) падения цен отмечались для Se, Re, V, Ce, Ta, Y, Sc, U, циркона и др. Это объективный фактор, так как именно в силу малотоннажных производств крупные производители занимают доминирующее, если не монопольное, положение на мировом рынке, что, например, демонстрирует Китай, который с 2012 г. сокращает экспорт редкоземельных металлов.

Поэтому, чтобы защитить внутренний рынок от монопольных тенденций и увеличить ресурсный потенциал, каждому государству сегодня необходимо заниматься «реанимацией» ранее известных резервных площадей и месторождений и подключать к ним новые перспективные. Для этого необходимо провести переоценку перспектив существующих объектов с тем, чтобы выявить имеющиеся рентабельные запасы. Одновременно в пределах месторождений нужно выделить блоки, более богатые редкометалльными рудами, отработка которых может дать высокую рентабельность, по крайней мере на срок окупаемости капиталовложений [2].

В числе первоочередных задач должна быть рассмотрена и геолого-экономическая оценка территории, в частности, Узбекистана, применительно к каждому региону, рудному району и рудному узлу. Это позволит принять обоснованные решения о финансировании поисковых и поисково-оценочных работ на стратегические редкие металлы, результаты которых должны быть положены в основу создания промышленных кластеров (горная добыча – обогащение – химико-металлургический передел – промышленное использование).

И наконец, еще одно очень важное направление исследований связано с вовлечением в переработку техногенных и вторичных источников редких металлов – зольных отвалов ТЭЦ, «хвостов» обогатительных фабрик, продуктов переработки руд цветных и редких металлов и т. д. (в США около 25 % потребности в тантале и 50 % в галлии и германии удовлетворяют за счет вторичного сырья).

Реализация всех этих мер возможна лишь при государственной поддержке, что заключается в составлении долгосрочной программы разработки собственных проявлений редких металлов, а в качестве ее основных направлений – создание базы промышленного освоения редких металлов и оптимальных условий для привлечения иностранных инвестиций в эту отрасль, максимально полного извлечения из руд попутных редких элементов.

Отметим, что в Узбекистане уже несколько десятилетий производится извлечение редких элементов (**Se, Te, Cd, In, Re, Sc, Ga, Ge, Bi**) при добыче урановых и сульфидных руд, в то время как редкометалльное оруденение редкоземельного и литофильного профиля (**Ta, Nb, Be, Li, Rb, Cs**) до последнего времени остается в Республике невостребованно-нетрадиционным.

Таким образом, государственная стратегия развития редкометалльной отрасли Узбекистана на ближайшие годы – это укрепление сырьевой базы за счет небольших, компактных, желательно малокомплексных объектов, разработки вторичных, в том числе и бросовых, ресурсов с усилением роли технологических и экономических исследований.

В земной коре вариации распределения лито-оксифильных редких элементов по группам их эндогенных, метаморфогенных и экзогенных месторождений весьма значительны и требуют пристального внимания исследователей.

Так, на долю эндогенных месторождений приходится от 23 до 94 % всех мировых запасов редких металлов. Максимальная доля запасов присуща бериллию, ниобию, танталу. Значительны они также у редких земель и цезия. Разведанные в настоящее время запасы тантала и ниобия в мире составили (в металле) 110 тыс. т тантала и 4,6 млн т ниобия.

В экзогенных месторождениях мира содержатся существенные запасы всех редких элементов, доля их колеблется от 8–9 % у тантала и бериллия до 56–77 % лития, рубидия, стронция, циркония [4].

Однотипность электронного строения атомов тантала и ниобия, а также сходство радиусов их ионов (0,072 нм), близость ионизационных потенциалов и кристаллической

структуры объясняют исключительное сходство химических и физических свойств этих элементов. В рудах и минералах они всегда встречаются вместе и их разделение — одна из наиболее сложных задач химической технологии.

Минералогия тантала и ниобия обширна. Из общего числа (более 400) гипогенных минералов литофильных редких элементов более трети составляют минералы тантала и ниобия. Наличие такого количества их минералов объясняется высокими энергетическими показателями Ta и Nb (в частности, высокими потенциалами ионизации) по сравнению с другими редкими металлами. К настоящему времени выявлено 47 танталовых, 108 ниобиевых минералов, хотя эти цифры условны из-за большой сложности состава минералов, невозможности порой отделения вида от разновидности.

Резкое, более чем вдвое, преобладание минералов ниобия над минералами тантала объясняется большей распространенностью первого в земной коре (17 г/т ниобия и 1,5 г/т тантала).

Ниобий обладает большей распространенностью в щелочных месторождениях, где его содержание на порядок выше, чем в гранитных пегматитах и кислых танталоносных гранитах. В результате в щелочных месторождениях образуется обширный класс силикатов и силикофосфатов ниобия, что совершенно нехарактерно для тантала.

Возникновению большого числа минералов ниобия способствует также более высокий, чем у тантала, потенциал ионизации.

По составу в 155 природных соединениях тантала и ниобия выделяют следующие классы: самородные (1), карбиды (1), оксиды и гидроксиды (3), сложные оксиды (127), бораты (1), боросиликаты (1), силикаты и силикофосфаты (21). Из **47 минералов тантала** лишь 1 является карбидом, 1 оксидом, 1 боросиликатом, 1 боратом, остальные — сложные оксиды; из **108 минералов ниобия** — 1 самородный, 1 оксид, 1 гидроксид, 84 сложных оксида, 21 силикат и силикофосфат.

Минералы тантала и ниобия из класса сложных оксидов обладают сложным химическим составом. Содержание пятиоксида тантала в них колеблется от долей процента до 85 %, пятиоксида ниобия — от долей процента до 80 %. Между танталом и ниобием наблюдается практически непрерывный изоморфизм.

Величина отношения ниобия к танталу в минералах изменяется в широких пределах (0,2–95), в большинстве случаев 3–10. Обычное многократное преобладание ниобия над танталом объясняется соответствующим соотношением их кларков (или концентраций) в конкретных горных породах.

В то же время преобладание тантала над ниобием в касситеритах, гранатах, турмалинах нельзя объяснить соответствующим соотношением их концентраций в расплаве-растворе в период образования минералов и, видимо, вызвано благоприятными условиями для изоморфного вхождения в кристаллические структуры.

Для изучения формы нахождения тантала и ниобия в минералах необходимы дополнительные исследования. Однако далеко не весь тантал и ниобий находятся в изоморфной форме. По-видимому, значительная часть их присутствует в виде тончайших субмикроскопических включений тантало-ниобатов, иначе трудно объяснить хотя и незначительное, но почти постоянное наличие тантала и ниобия в кварце, полевых шпатах и некоторых других минералах. Тем не менее, в слюдах, гранатах и касситеритах какая-то часть этих элементов, несомненно, представлена изоморфной формой.

Тантал и ниобий наиболее часто замещаются близкими по размеру ионных радиусов и обладающими той же шестерной координацией титаном и оловом. Содержание оксида титана в сложных оксидах ниобия достигает 59 %, оксида олова — 28 %. Для минералов тантала титан менее характерен, лишь в 6 из 40 его сложных оксидов он

указан в формуле. Для минералов тантала гораздо более характерно присутствие олова, которое входит в формулу восьми его сложных оксидов и только одного оксида ниобия.

Особенно заметно геохимическое родство тантала с оловом при обогащении касситерита танталом по сравнению с ниобием, даже если в руде тантала и ниобия содержится примерно одинаково.

Из других элементов, замещающих тантал и ниобий, значительные концентрации в их сложных оксидах (правда, в единичных минералах) образуют лишь *вольфрам, цирконий, сурьма, алюминий, трехвалентное железо, марганец*. Как примеси часто и в больших количествах присутствуют *двухвалентное железо, марганец, иттрий, лантаноиды, натрий, кальций, уран*.

Для минералов тантала наиболее характерно железо, в которых оно часто замещается марганцем. Кальций наиболее характерен для минералов ниобия, в минералах тантала он редок, часто замещается натрием.

Редкие земли в количестве до 35 % (иногда до 50 %) являются самой распространенной составной частью сложных оксидов тантала и ниобия. При этом в минералах тантала почти монополюбно распространены иттрий и иттриевые лантаноиды, тогда как в минералах ниобия более распространены цериевые лантаноиды, хотя минералы с иттрием также представлены достаточно широко.

В большей части сложных оксидов тантала и ниобия присутствует уран (менее 20 %), иногда вместе с торием. Радиоактивные элементы, обычные в минералах ниобия, встречаются лишь в единичных минералах тантала. Наблюдаются оксиды свинца, сурьмы, магния, а также гидроксил — его содержит каждый третий минерал Nb и Ta, а каждый шестой — также и фтор.

Ниобий в силикатах замещается титаном чаще, чем в сложных оксидах. Если титан содержится в 15 силикатах ниобия (из 21), то цирконий только в трех. Тем самым и в силикатах, как и в сложных оксидах, ниобий более тяготеет к титану, чем к цирконию.

Из 108 минералов ниобия практическое значение имеют (доля мировых запасов ниобия, %): пироклор — 78; колумбит и церофергусонит — 7; лопарит — 6; гатчеттолит — 1; танталит — 2,1; пандайт, ильменорутил, фергусонит, эвксенит, эшинит — 0,8; а также примеси ниобия в эвдиалите, ловозерите, касситерите и др. — 5,1. Перерабатывается в основном пироклор, в меньшей степени колумбит и лопарит.

Из 47 минералов тантала практическое значение имеют (доля мировых запасов тантала, %): танталит — 33,5; колумбит — 45; тантал, пироклор — 10; самарскит, фергусонит, эшинит, пандайт, ильменорутил — 3,7; гатчеттолит — 3,8; микролит — 3; воджинит — 3; тапиолит — 2; стрюверит — 1; касситерит — 0,5; примеси в других минералах — 11,5. Почти весь тантал получают из танталита, микролита, воджинита и касситерита.

Рассматривая роль магматических и гидротермально-метасоматических факторов в образовании ниобиевых и танталовых месторождений в кремнещелочных и щелочных магмах, ряд исследователей пришел к выводу о том, что по экспериментальным данным возможно заключить, что субщелочные и щелочные магмы (полевошпатовые и фельдшпатоидные) относительно кремнекислых магм сильно обогащены фтором, что в свою очередь обуславливает концентрацию в них редких земель, циркония, гафния, ниобия, тантала, бериллия и многих других фторофильных элементов [3]. Из числа этих элементов экспериментально исследовались ниобий и тантал. Было изучено распределение ниобия и тантала (при концентрациях ниже 0,3 вес. %) между несмешивающимися равновесными расплавами в калиевой системе в температурном интервале 1000–1300 °С в условиях стандартного

давления. Результаты экспериментов показали существенное относительное обогащение щелочных фторидных расплавов этими элементами, причем ниобий распределяется между фазами более контрастно (коэффициент разделения 3–5) по сравнению с танталом (коэффициент разделения 2–4), вследствие чего щелочные фторидные расплавы характеризуются значительно более высоким ниобий-танталовым отношением по сравнению с равновесными с ними кремнекислыми расплавами: экспериментально определенный коэффициент распределения варьирует от 1,33 ($T=1300^\circ$) до 1,73 ($T=1000^\circ$). Ниобий-танталовое отношение фторидных расплавов существенно возрастает с падением температуры. Следовательно, чем выше температура отщепления фторидных расплавов, тем они должны быть более специализированными на тантал. В общем же проведенные исследования характеризуют ликвацию как очень эффективный процесс концентрации ниобия и тантала. Отщепляющиеся фторидные расплавы ведут себя как экстрагенты фторофильных рудогенных металлов (в данном случае ниобия и тантала), во многом определяя металлогеническую специализацию магматических комплексов. Значение ликвации как эффективного фактора селективной концентрации рудогенных металлов становится все более заметным в связи с тем, что в результате ее возникают флюидно-магматические расплавы, сильно обогащенные рудогенными металлами и летучими компонентами. В ходе их последующей кристаллизации происходит отделение флюидных компонентов с образованием гидротермальных систем рудообразования (в том числе и тантало-ниобиевых).

В последние годы геологической службой Мингеологии предприняты активные действия по проведению комплексной оценки редкометаллоносности Узбекистана и сопредельных территорий с переоценкой известных и выявлению новых проявлений редких элементов, к примеру, генетически связанных с литий-фтористыми гранитами и гранитными пегматитами [1]. Их руды, в отличие от руд редкометалльных щелочных гранитов и сиенитов, *выгодно отличаются превышениями концентраций более дефицитного тантала над ниобием и более простой технологией их извлечения наряду с попутными Be, REE, Li, Cs, Sn и др.*

По имеющимся на сегодня материалам, суммарные активные прогнозные ресурсы пентоксидов тантала и ниобия в Узбекистане оцениваются в 21500 тонн. Прогнозные ресурсы лития и бериллия оцениваются в десятки тысяч тонн.

По результатам обобщения и анализа мирового опыта изучения и эксплуатации редкометалльных месторождений нами установлено, что ряд объектов в Узбекистане (Сулатсай, Мангит, Саргардон, Устук, Алтынтау, Тосбулак, Сартакчи) на существующем уровне изученности по параметрам оруденения и концентрации тантала, ниобия, REE, бериллия и лития соответствуют мелким и средним месторождениям гранитной и перигранитной формаций, известным в различных регионах мира (Россия, Казахстан, Египет, Намибия, Эфиопия, Зимбабве, Китай, регионы Центральной Азии, Афганистан, Австралия, Монголия, Индия, Мадагаскар и др.).

Очень важно, что подавляющая часть объектов Узбекистана находится в условиях хорошо развитой инфраструктуры (энергия, транспортные магистрали, вода, стройматериалы, кадровые ресурсы), что очевидно должно активно стимулировать инвестиции и привлечение современных обрабатывающих технологий в геологоразведочную и горнодобывающую отрасли Республики.

Благоприятное обстоятельство в развитой инфраструктуре Узбекистана – это блоки горнорудной промышленности, могущей обеспечить, при необходимости, получение конечной тантало-ниобиевой (металл) и другой продукции, для металлургических

предприятий Навоийского и Алмалыкского ГК, фарфоровых заводов Ташкента, Самарканда и др.

Для оценки ресурсных потенциалов Ta_2O_5 и Nb_2O_5 в редкометалльных объектах и площадях Узбекистана и Киргизии нами предложено 47 объектов. В результате становится очевидным значительное расхождение в них уровней концентрации (lg тонн) пентоксидов ниобия и тантала, достигающее более 4-х порядков. Характерно, что распределение значений ресурсного потенциала для Nb_2O_5 носит более контрастный характер по отношению к Ta_2O_5 . Совместное распределение ресурсных потенциалов Ta_2O_5 и Nb_2O_5 для тех же объектов показано на гистограмме. Распределение отличается рядом особенностей. Так, при сравнении отдельных групп ресурсных потенциалов наблюдается превышение Ta_2O_5 над Nb_2O_5 в карбонатитах (объекты Тутек, Дельбек) и двух пегматитовых зонах (объекты Сулатсай, Кетменчи). Во всех остальных объектах налицо преобладание ресурсного потенциала Nb_2O_5 над Ta_2O_5 , которое в целом достаточно контрастно. При этом можно выделить несколько пегматитоносных зон, где располагаются объекты с очень близкими ресурсными потенциалами Ta_2O_5 и Nb_2O_5 . Это – зона Северного Нуратау (объекты Кызылча, Эшанское, Водопадное, Каричсай) и Лолабулак-Баянкаринская зона (объекты Джам, Кочкарбулак, Уйшун, Ираль).

Для прямого расчета индекса Nb_2O_5/Ta_2O_5 как основы соответствующей классификации редкометалльных объектов Узбекистана и Киргизии выведена последовательность отношений этих элементов.

Условия регионального размещения тантало-ниобиевого оруденения (индекс Nb_2O_5/Ta_2O_5) определены позициями концентров редкометаллоносных гранитных и карбонатитовых магм в структуре Главного Тянь-Шаньского редкометалльного пояса и близлежащих территориях (рис. 1), включая Кыргызстан.

Особенностью пространственного положения редкометалльных (REE, Nb, Ta, U, Th) объектов Туркестано-Алайского концентра является их приуроченность к линейным зонам карбонатитов в контакте с альбититами, щелочными гранитами и сиенитами. Далее, к западу от концентра, на территории Узбекистана интенсивность проявления щелочного и карбонатитового магматизма, как и его рудоносность, уже резко снижаются.

Все выделенные магмоконцентры в геологической структуре Западного Тянь-Шаня различаются как по количеству присутствующих в них редкометалльных объектов, так, и что особенно важно, по степени относительной концентрации в них ниобия и тантала (индекс Nb_2O_5/Ta_2O_5), разделенной на 5 классов (рис. 1).

Таким образом, парагенетические особенности рассмотренных продуктов кристаллизации гранитных магм (как и карбонатитов) определяют в них резкую флюктуацию ниобий-танталового индекса.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

- 1) В Узбекистане в предыдущие годы исследований был выявлен ряд комплексных редкометалльных объектов, несущих также и тантал-ниобиевое оруденение, которое по особенностям признаков геолого-промышленной типизации может быть приближено к подобным же мелким и средним по масштабам редкометалльным объектам мира.
- 2) Расширение перспектив Ta-Nb объектов Узбекистана за счет их флангов и глубоких горизонтов может быть достигнуто, учитывая сложный многокомплексный минералогический состав редкометалльных руд, только с проведением их минерагенического картирования с применением новейших аналитических

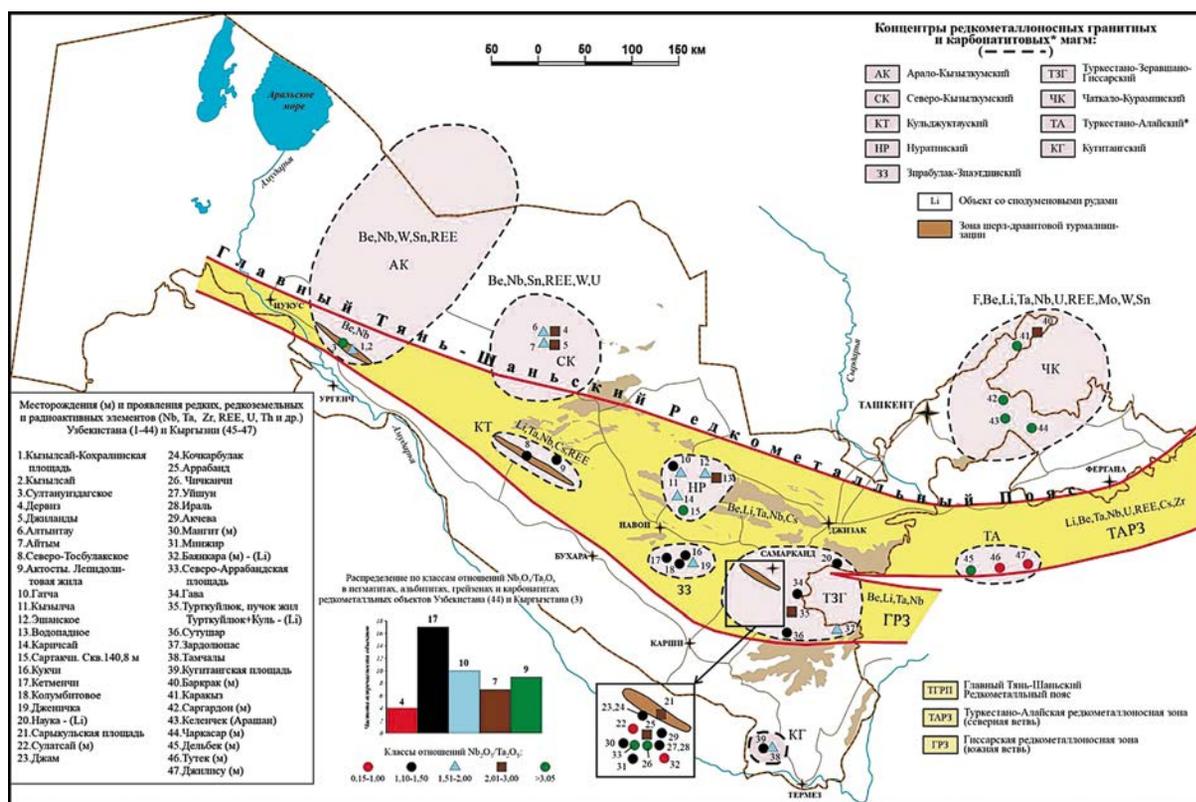


Рисунок 1. Схема размещения концентров гранитных и карбонатитовых магм с ниобиевым и танталовым оруденением в продуктах их кристаллизации (индекс Nb₂O₅/Ta₂O₅) в структуре Западного Тянь-Шаня

методик (эмиссионно-спектрометрический с индуктивно связанной плазмой, микрозондирование и др.) и определением степени технологичности руд.

- 3) Узбекская часть региона Западного Тянь-Шаня характерна интенсивным проявлением на ней комплексов кремнещелочных магм, площадь поверхности выходов которых на сегодня изучена на уровне оценки потенциала редкометаллоносности немногим более чем наполовину. Это тоже активный резерв расширения минерально-сырьевой базы редких металлов Республики Узбекистан.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Ежков Ю.Б., Рахимов Р.Р., Панасюченко В.К., Новикова И.В. Редкие элементы Узбекистана. Ташкент, 2013. 150 с.
- 2) Кременецкий А.А., Архипова Н.А. Вклад редких металлов в повышение инвестиционной привлекательности центров экономического роста России. Тезисы докладов. Редкие металлы: минерально-сырьевая база, освоение, производство, потребление. М.: ИМГРЭ, 2011. С. 80–81.
- 3) Маракушев А.А., Иванов И.П., Римкевич В.С. Значение ликвации в генезисе магматических горных пород. Вестн. МГУ. 1979, № 1. С. 3–21.
- 4) Месторождения литофильных редких металлов. Под ред. Овчинникова Л.Н. и Солодова Н.А. М.: Недра, 1980. 559 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ЦЕРИЯ ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ

Богатырева Е.В., Карташева А.И.
НИТУ «МИСИС», Москва

Значение редкоземельных металлов (РЗМ) и их соединений для промышленности непрерывно растет благодаря их использованию во многих современных технологиях, в том числе в производстве каталитических фильтров-нейтрализаторов выхлопных газов автомобилей, волоконной оптики, лазеров, люминофоров и сверхпроводников, полирующих порошков и др.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью создания научно-технологического задела и возрождения полного цикла РЗМ-содержащей продукции в России для развития отечественных наукоемких конкурентоспособных технологий получения стратегически важных материалов.

На экспериментальном предприятии ООО «ЛИТ» осаждение соединений церия ведут из азотнокислых растворов с концентрацией Ce_2O_3 и HNO_3 120 и 80 г/л соответственно, и 20 %-ным раствором карбоната аммония в три стадии (Патент РФ № 2693176). Продолжительность процесса осаждения соединений церия составляет 60–80 мин. По данным рентгенофазового анализа (РФА) было установлено, что продукт осаждения содержит две фазы: 60,3 масс. % $\text{Ce}_2\text{O}(\text{CO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и 39,7 масс. % $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, средний размер частиц осадка соответствует 8 мкм. Микрофотография полученного продукта осаждения ООО «ЛИТ» представлена на рис. 1.

Исследование влияния продолжительности процесса осаждения соединений церия из азотнокислых растворов на состав получаемого продукта выполнено для системы технологический раствор нитрата церия (в соответствии с Пат. РФ № 2693176) – 20 %-ный раствор карбоната аммония. Осаждение вели в одну стадию в течение 2 минут из раствора церия с концентрацией Ce_2O_3 и HNO_3 120 и 90 г/л соответственно. РФА продукта осаждения выявил наличие одной фазы – $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Средний размер частиц продукта осаждения составил 19,5 мкм, а его микрофотография представлена на рис. 2.

На основании результатов исследования процесса осаждения карбоната церия из азотнокислых растворов раствором карбоната аммония установлено следующее:

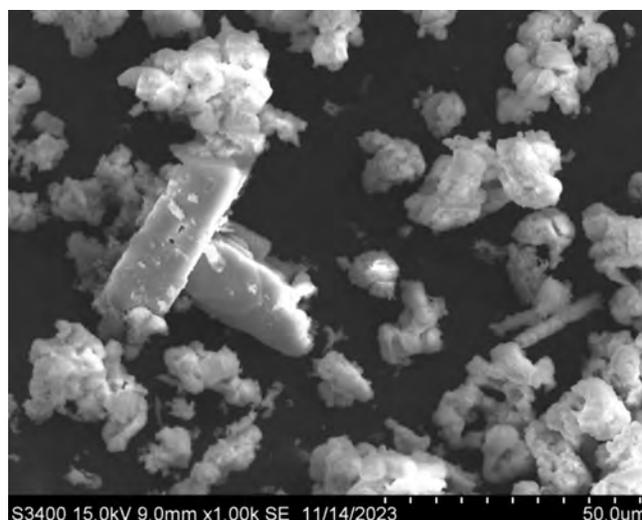


Рисунок 1. Микрофотография продукта осаждения карбоната церия ООО «ЛИТ»

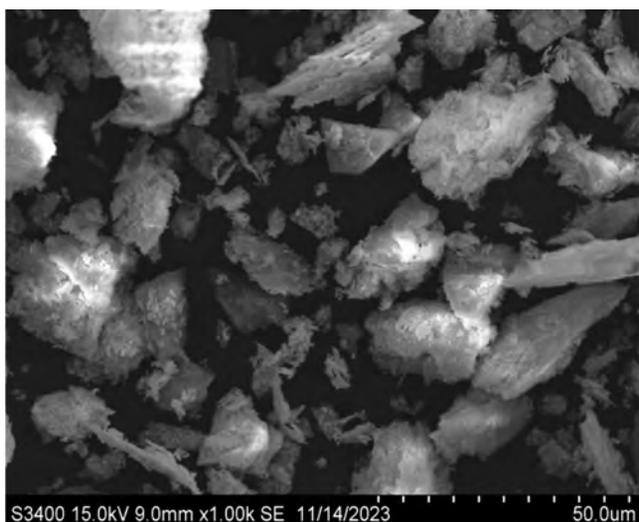


Рисунок 2. Микрофотография продукта осаждения карбоната церия НИТУ «МИСИС»

образование фазы $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ первично, далее процесс осаждения сопровождается появлением фазы $\text{Ce}_2\text{O}(\text{CO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, доля которой увеличивается, и за 60–80 минут достигает более 60 %. Механизм этого явления требует дополнительных исследований.

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОСОДЕРЖАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ НЕОДИМА НА СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНТЕЗИРУЕМОГО КОБАЛЬТИТА НЕОДИМА

Богатырева Е.В., Мельник Ф.
НИТУ «МИСИС»

Интерес исследователей к кобальтиту неодима обусловлен рядом его уникальных свойств и перспективных областей применения (рис. 1).



Рисунок 1. Некоторые свойства и направления применения кобальтита неодима

Актуальность исследований обусловлена:

- 1) Существенным влиянием режимов получения кобальтита неодима на его свойства;
- 2) Противоречивостью опубликованных сведений о физических свойствах кобальтита неодима.

Учитывая, что некоторые свойства кобальтита неодима, определяющие перспективность его применения, являются структурно-чувствительными, представляло интерес исследовать влияние энергосодержания неодимсодержащих прекурсоров на структурные характеристики и энергосодержание синтезируемого из них кобальтита неодима с применением методики оценки энергетического состояния кристаллической решетки (ЭСР) соединений по данным рентгеноструктурного анализа [1]:

$$\Delta E_{\Sigma} = \Delta E_d + \Delta E_{\Sigma} + \Delta E_{\varepsilon} = K \cdot E_{\text{реш}} + 6 \cdot V_{\text{mol}} \cdot E_{\text{пов}} \cdot (D_i^{-1} - D_o^{-1}) + 1,5 \cdot V_{\text{mol}} \cdot E_{\text{ю}} \cdot (e_i^2 - e_o^2),$$

где ΔE_d , ΔE_{Σ} , ΔE_{ε} – избыточное энергосодержание, связанное с отклонением параметров кристаллической решетки исследуемого соединения от термодинамически равновесных (справочных значений), запасенное в виде поверхности ОКР и микродеформаций, соответственно; K – коэффициент пропорциональности; $E_{\text{реш}}$ – энергия кристаллической решетки соединений, кДж/моль; $E_{\text{пов}}$ – удельная поверхностная энергия соединения, Дж/м²; $E_{\text{ю}}$ – модуль Юнга, Па; V_{mol} – мольный объем, см³/моль; D_i , D_o – размеры ОКР, см; e_i , e_o – среднеквадратичные микродеформации соединения, дол. от ед.

Анализ структурных характеристик исходных карбонатов и оксидов неодима показал, что они неравновесны [2, 3]. Их избыточная энергия, определенная по методике ЭСКР с применением РСА, составила для карбонатов $\text{Nd}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Nd}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ 120 и 472 кДж/моль (рис. 2 а, б), а для оксидов неодима, полученных прокаливанием при температуре 900 °С в течение 4 часов указанных карбонатов неодима, 430 и 437 кДж/моль соответственно (рис. 2 в, г).

Характеристики образцов кобальтита неодима, синтезированных керамическим методом при температурах 900 и 950 °С в течение 4 часов на каждой стадии двухстадийного процесса с промежуточным истиранием продукта синтеза, приведены в табл.

Установлено, что при синтезе кобальтитов неодима из оксидов и карбонатов неодима происходит релаксация избыточной энергии. Так, кобальтит неодима (*образец 1*, табл.), синтезированный из оксида неодима Nd_2O_3 , полученного прокаливанием $\text{Nd}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ при температуре 900 °С в течение 4 часов, характеризуется минимальной величиной избыточной энергии ($\Delta E_{\Sigma} \approx 1,5$ кДж/моль) от термодинамически равновесной структуры. Для кобальтита неодима (*образец 3*, табл.), синтезированного из Nd_2O_3 , полученного прокаливанием $\text{Nd}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ при прочих равных условиях, наблюдается подобный эффект, но величина его избыточной энергии выше на 7 кДж/моль и соответствует разнице избыточной энергии оксидов неодима, использованных для синтеза. Повышение температуры синтеза кобальтита неодима из карбоната $\text{Nd}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ с 900 до 950 °С (*образец 2*, табл.) сопровождается увеличением его энергосодержания более, чем в 5 раз, тогда как для *образца 4* (табл.) этот эффект мало выражен и не превышает 10 %.

Синтез кобальтитов неодима из гидратированных карбонатов – $\text{Nd}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Nd}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ (*образцы 5,7*, табл. 1) выявил снижение энергосодержания продукта синтеза по сравнению с энергосодержанием исходных карбонатов в 10 и 30 раз и превышение этого показателя по сравнению с кобальтитом неодима (*образец 1*, табл. 1) в 11 и 15 раз соответственно. Повышение температуры синтеза с 900 до 950 °С при

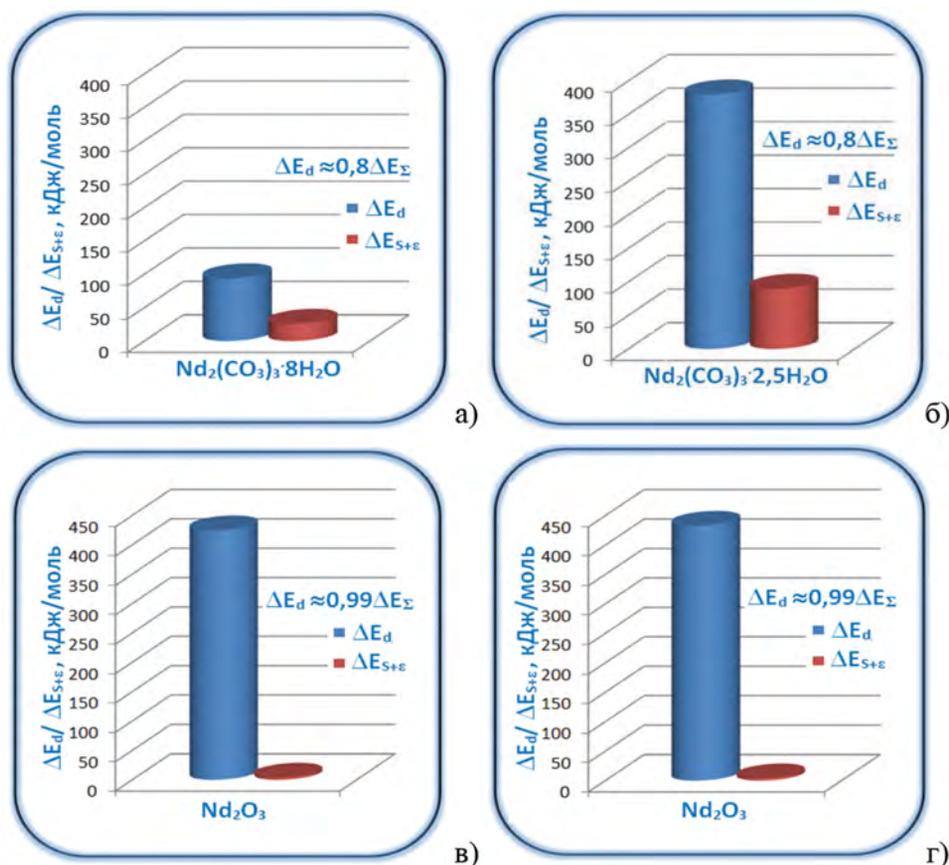


Рисунок 2. Энергетические характеристики Nd-содержащих прекурсоров: а) $Nd_2(CO_3)_3 \cdot 8H_2O$; б) $Nd_2(CO_3)_3 \cdot 2,5H_2O$; в) Nd_2O_3 , полученного прокаливанием $Nd_2(CO_3)_3 \cdot 8H_2O$; г) Nd_2O_3 , полученного прокаливанием $Nd_2(CO_3)_3 \cdot 2,5H_2O$

Таблица

Характеристики синтезированного керамическим методом кобальтита неодима

№ обр.	Nd-содержащие прекурсоры		Температура синтеза, °С	Параметры кристаллической решетки $NdCoO_3$, Å			ΔE_d , кДж/моль	
	карбонат	оксид		a	b	c		
1	$Nd_2(CO_3)_3 \cdot 8H_2O$	Nd_2O_3	900	$5,344 \pm 0,002$	$7,551 \pm 0,002$	$5,336 \pm 0,002$	0	$\Delta E_d = (0...0,57) \Delta E_{\Sigma}$
2	$Nd_2(CO_3)_3 \cdot 8H_2O$	Nd_2O_3	950	$5,337 \pm 0,002$	$7,550 \pm 0,002$	$5,342 \pm 0,002$	4,57	
3	$Nd_2(CO_3)_3 \cdot 2,5H_2O$	Nd_2O_3	900	$5,342 \pm 0,002$	$7,550 \pm 0,002$	$5,336 \pm 0,002$	7,18	$\Delta E_d = (0,70...0,85) \Delta E_{\Sigma}$
4	$Nd_2(CO_3)_3 \cdot 2,5H_2O$	Nd_2O_3	950	$5,333 \pm 0,002$	$7,549 \pm 0,002$	$5,346 \pm 0,002$	6,53	
5	$Nd_2(CO_3)_3 \cdot 8H_2O$	-	900	$5,339 \pm 0,002$	$7,549 \pm 0,002$	$5,339 \pm 0,002$	9,14	$\Delta E_d = (0,79...0,85) \Delta E_{\Sigma}$
6	$Nd_2(CO_3)_3 \cdot 8H_2O$	-	950	$5,333 \pm 0,002$	$7,548 \pm 0,002$	$5,344 \pm 0,002$	13,06	
7	$Nd_2(CO_3)_3 \cdot 2,5H_2O$	-	900	$5,332 \pm 0,002$	$7,549 \pm 0,002$	$5,345 \pm 0,002$	11,75	
8	$Nd_2(CO_3)_3 \cdot 2,5H_2O$	-	950	$5,331 \pm 0,002$	$7,548 \pm 0,002$	$5,346 \pm 0,002$	13,71	

Примечание: синтез кобальтита неодима – двухстадийный процесс: $t = 900$ и 950 °С; $\tau = 4$ часа на каждой стадии, с промежуточным истиранием полупродукта.

использовании $Nd_2(CO_3)_3 \cdot 8H_2O$ и $Nd_2(CO_3)_3 \cdot 2,5H_2O$ (образцы 6,8, табл.) не оказывает существенного влияния на энергосодержание получаемых продуктов, и их энергетические характеристики сопоставимы.

Следовательно, генезис и избыточная энергия прекурсоров влияют на энергосодержание продукта синтеза – кобальтита неодима – и могут оказывать влияние на его свойства [4], а это открывает возможность целенаправленного прогноза и управления структурно-чувствительными свойствами кобальтита неодима и синтеза материала с заданными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Богатырева Е.В. Эффективность применения механоактивации. М.: Изд. Дом НИТУ «МИСиС», 2017. 334 с.
- 2) B. Valina, J.D. Rodriguez-Blanco, Andrew P. Brown. The role of amorphous precursors in the crystallization of La and Nd carbonates //The royal society of chemistry. 2015. Nanoscale. T. 7. C. 12166–12279.
- 3) Material Project // Structure of neodymium oxide. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.materialsproject.org/materials/mp-2763/> (дата обращения 09.10.20).
- 4) Богатырева Е.В., Мельник Ф. Влияние энергосодержания соединений неодима на удельную электропроводность кобальтита неодима // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14. № 2. С. 41–44. (DOI: 10.37614/2949–1215.2023.14.2.006)

ХЛОРНЫЙ СПОСОБ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФЕЛИНОВОГО И КАОЛИНОВОГО СЫРЬЯ

*Ветчинкина Т.Н., Балмаев Б.Г., Тужилин А.С.
ИМЕТ РАН, Москва*

Современный процесс получения алюминия в основном базируется на производстве глинозема по способу Байера с последующим электролизом криолит-глиноземных расплавов (процесс Эру-Холла). В качестве альтернативного метода производства алюминия может быть предложен хлорный способ, который позволяет расширить сырьевую базу, обеспечить создание эффективной энергосберегающей технологии за счет более низкой температуры электролиза хлоридных расплавов и использования графитовых нерасходуемых электродов.

Лабораторией физикохимии и технологии алюминия ИМЕТ РАН (г. Москва) совместно с ВАМИ (г. Санкт-Петербург) проведены исследования и опытно-промышленные испытания по хлорированию в условиях кипящего слоя различных видов алюминиевого сырья: каолиновых глин, переработанной нефелиновой руды Кольского месторождения, Североонежских бокситов, глинозема, черного глинозема, выделенного щелочным или кислотным обогащением алюминийсодержащего сырья. В результате выполненных исследований получены технологические и энергетические показатели процесса хлорирования с получением безводного хлорида алюминия [1].

Прямое хлорирование природного или техногенного сырья неэффективно, т. к. на хлорирование примесей используемого материала расходуется дополнительное количество хлора. Очистка от примесей дробной конденсацией полученного хлорида алюминия является дорогостоящей операцией. Кроме этого, необходимо решить вопрос об утилизации образующихся сопутствующих хлоридов [1]. Недорогое сырье (активное по отношению к хлору с минимальным количеством примесей) для хлорирования можно получить кислотным способом обогащения высококремнистого

алюминийсодержащего сырья с выделением черного глинозема [2]. Преимущество кислотной переработки, прежде всего, состоит в том, что уже на первом этапе производственного цикла отделяется практически полностью кремнезем породы и после ряда переделов выделяется черновой глинозем – оксид алюминия, содержащий 0,1–3,0 % примесей железа.

При производстве алюминия с использованием нефелинового концентрата (примерного состава, %: Al_2O_3 – 29,0; SiO_2 – 43,2; Fe_2O_3 – 3,0; FeO – 0,8; TiO_2 – 0,37; CaO – 1,7; P_2O_5 – 0,65; MgO – 0,8; Na_2O – 12,0; K_2O – 7,12; п.п.п. – 1,26), который перерабатывают щелочным способом спекания с известняком, на следующей стадии процесса – выщелачивании – в раствор переходит кремнезем. Для очистки от кремнезема необходимо проводить двухступенчатое обескремнивание и дополнительную карбонизацию, кальцинацию при 1100–1200°C с целью получения α – Al_2O_3 . При производстве алюминия по хлорной технологии используется черновой глинозем, полученный после термического разложения гидроксида алюминия, который может содержать 2,0–2,5 % масс. алюмосиликата натрия. Дополнительную стадию очистки в этом случае проводить не требуется. Для достижения высокой степени хлорирования можно выделить черновой глинозем низкотемпературной карбонизацией без глубокого обескремнивания при пониженной (до 800°C) температуре кальцинации. За счет этого, полученный черновой глинозем в качестве исходного сырья для хлорирования, по нашим оценочным расчетам, может быть дешевле примерно на 5–25 %, чем товарный [3, 4].

Хлорный способ производства алюминия можно будет реализовать на основе качественной перестройки технологии и аппаратного оснащения предприятий. Таким образом, для решения поставленной задачи, а именно создания безотходной технологии переработки алюминийсодержащего сырья, наиболее эффективным является хлорный способ получения алюминия, который состоит из двух основных переделов – производства хлорида алюминия и его электролиза.

Преимущества способа производства алюминия электролизом из его хлорида по сравнению с электролизом криолит-глиноземных расплавов заключаются в следующем:

- в возможности использования низкокачественного алюминийсодержащего сырья;
- в снижении примерно на 30 % удельного расхода электроэнергии (электролиз хлорида алюминия протекает при температуре 700°C, а электролиз криолит-глиноземных расплавов – при 950–960°C);
- в исключении расхода высококачественных углеродсодержащих материалов (при электролизе хлорида алюминия используются графитовые нерасходуемые электроды);
- в применении менее дефицитных и агрессивных хлоридов вместо фторидов.

Работа выполнена в рамках гос. задания № 075–01176–23–00.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Ветчинкина Т.Н., Лайнер Ю.А., Рожков Д.Ю., Тужилин А.С. Переработка минерального сырья хлорным способом с применением кислотного обогащения // Тезисы докладов 9-го международного конгресса «Цветные металлы и минералы», г. Красноярск, 11–15 сентября 2017 г. С. 545–550.
- 2) Балмаев Б.Г., Пак В.И., Иванов М.А., Смирнов А.А. Испытание экспериментального комплекса получения глинозема по кислотному способу из высококремнистого алюминиевого сы-

рья // Тезисы докладов 9-го международного конгресса «Цветные металлы и минералы», г. Красноярск, 11–15 сентября 2017 г. С. 184–185.

- 3) Ветчинкина Т.Н. Физико-химические основы процесса хлорирования оксида алюминия, полученного из его гидратных форм // *Металлы*. 2022. № 6. С. 3–8.
- 4) Ветчинкина Т.Н., Балмаев Б.Г. Хлорирование оксида алюминия, полученного при переработке нефелинового концентрата, и сравнительная оценка полного цикла производства алюминия // *Перспективные материалы*. 2019. № 6. С. 75–82.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СЕРЕБРА ИЗ ОБЕЗМЕЖЕННЫХ ШЛАМОВ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО РАФИНИРОВАНИЯ ВТОРИЧНОЙ МЕДИ

*Выдыш С.О., Богатырева Е.В.
НИТУ «МИСИС», Москва*

Медь необходима для экономической деятельности и технологического прогресса общества, в основе которого лежит глобальная концепция устойчивого развития. Ее частью является снижение потребления первичных рудных материалов путем увеличения переработки вторичного сырья.

Штаб-квартирой International Study Copper Group прогнозируется ежегодный рост производства рафинированной меди до 4,4 % при увеличении ежегодной добычи до 3 % [1]. Экономические исследования подтверждают постепенное усиление мирового дефицита рафинированной меди, способствующее началу разработки новых месторождений в мире, однако это требует дополнительных инвестиций, что, вероятно, будет способствовать повышению биржевых цен на медь.

Увеличение объема переработки вторичной меди может способствовать сокращению мирового дефицита меди. Основным отличием анодных шламов электролитического рафинирования вторичной меди от первичной является отсутствие в составе трудновскрываемых селенидов и теллуридов. Это означает, что серебро в шламе находится в металлической и хлоридных формах.

Практика переработки шламов построена на операции их плавки после удаления меди с последующим рафинированием и получением сплава Доре [2]. Но данный процесс отличается высокими потерями серебра со шлаками, содержание Ag в которых достигает 0,4 %, а их образование составляет от 0,9 до 1,2 т/т шлама; низкой комплексностью использования сырья, так как Pb и Sn не извлекаются и остаются в шлаках; высокими капитальными затратами и энергоемкостью.

Актуальность работы обусловлена необходимостью комплексного гидрометаллургического подхода к переработке анодных шламов электролиза вторичной меди с извлечением основных ценных компонентов, содержащихся в них: Cu, Ag, Au, Pb, Sn.

Гидрометаллургическое восстановление серебра из его хлорида позволит исключить передел плавки обезмеженного шлама из цикла их переработки. Основные варианты систем восстановления серебра из его хлорида:

- AgCl-Fe/Zn/Al в солянокислом растворе, но требуется высокая степень контакта Fe/Zn/Al с AgCl и возможно выделение водорода;
- AgCl-гидразин гидрат, чье применение ограничено его высокой стоимостью;
- AgCl-формальдегид, который является токсичным и пожароопасным;

– AgCl-сахар, являющийся безопасным и доступным реагентом.

Объект исследования – обезмеженный шлам электрорафинирования вторичной меди с содержанием, %: 25–30 Pb, 15–20 Ba, 10–20 Sn, 5–10 Ag (10 % серебра содержится в форме хлорида, остальное – в металлической). Объект исследования подвергался восстановительной гидрометаллургической обработке в щелочном растворе NaOH при pH не менее 12, Т:Ж=1:4, температуре 60 °С, расходе сахара от 0,5 до 1,5 моль/моль AgCl и продолжительности 1 час.

Исследования показали, что более 99,9 % хлорида серебра восстанавливается при расходе 0,675 моль/моль AgCl, что позволяет привести серебро в шламе к одному фазовому состоянию – металлическому. Результаты исследования представлены на рисунке.

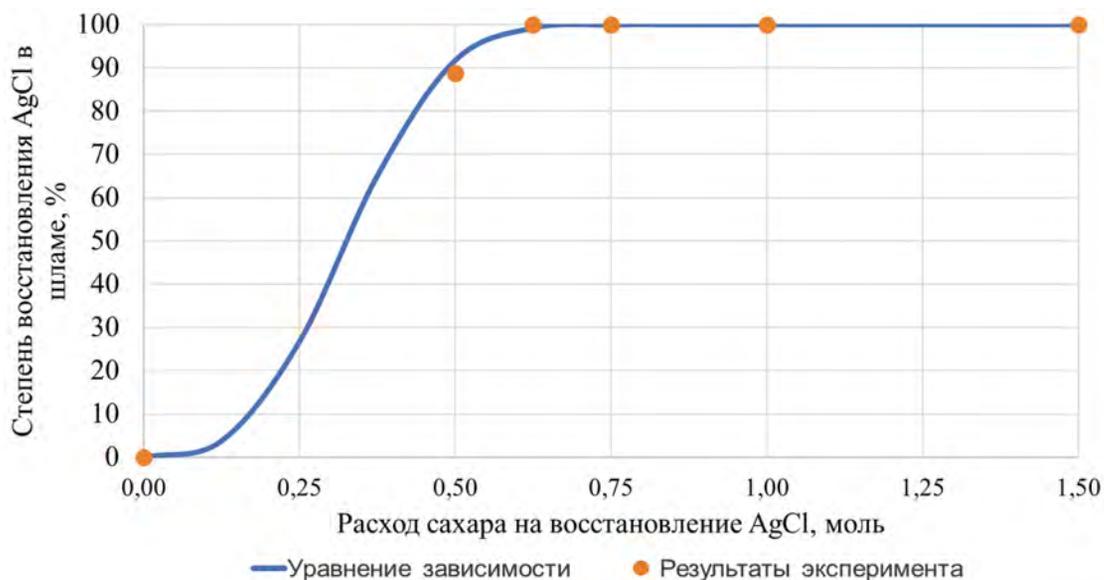


Рисунок. Зависимости влияния расхода сахара на восстановление хлорида серебра в обезмеженном шламе электролитического рафинирования вторичной меди ($t=60$ °С; pH не менее 12; Т:Ж=1:4; $t = 1$ ч)

Полученные результаты делают возможным дальнейшее извлечение серебра в азотнокислый раствор в присутствии пероксида водорода.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) International Copper Study Group [сайт]. – URL: <https://icsg.org/>.
- 2) Мастюгин С.А. Шламы электролитического рафинирования меди / С.А. Мастюгин, Н.А. Волкова, С.С. Набойченко, М.А. Ласточкина – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 258 с.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СКАНДИЯ В РАССОЛАХ БУХАРО-КАРШИНСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА

*Гафуров Т.А., Турсунметов Р.А., Тё В.С., Хасанбаев Х.Ф.
ГУ «Институт ГИДРОИНГЕО», г. Ташкент, Республика Узбекистан*

Особую роль для развития и расширения минерально-сырьевой базы Узбекистана играют ресурсы подземных вод, содержащие полезные компоненты. Нефтегазовые структуры, расположенные в пределах Бухаро-Каршинского артезианского бассейна, обладают потенциально высокими запасами промышленных ресурсов [2]. Важное стратегическое значение имеют рассолы, имеющие высокие показатели содержания редкоземельных элементов.

Технология извлечения данных полезных компонентов на сегодняшний день совершенствуется. Проводятся специальные лабораторные исследования по оценке возможности извлечения таких элементов, как скандий (Sc), золото (Au), йод (I), бром (Br), бор (B), литий (Li). На основе результатов выполненных исследований была дана предварительная оценка эксплуатационным ресурсам по отдельным структурам. В последние годы в современном мире развиваются методы и технологии по добыче стратегически важных редкоземельных элементов, одним из которых является скандий.

В данной работе предметом исследований служат рассолы, залегающие в верхнеюрских отложениях. В водоносных комплексах распространены разные по составу и минерализации подземные воды: от сложнокомпонентных пресных и слабосоленоватых до высококонцентрированных хлоридных рассолов, обогащенных многими ценными микроэлементами. Общая тенденция смены химического состава и увеличения минерализации наблюдается с северных и северо-восточных окраин на юг и юго-запад, а также вниз по гидрогеологическому разрезу. Первые рассолы встречаются в турон-палеоценовом водоносном комплексе в зоне Амударьинского разлома на структурах Керкидаг (до 96 г/л), Карамат-Нияз (до 54 г/л), Наразым (до 50 г/л) и др. В нижележащих водоносных комплексах площадь распространения рассолов и их минерализация возрастают. Максимально минерализованные рассолы встречены в межсоленосных линзах кимеридж-титона (до 450 г/л и более). Рассолы карбонатной толщи юры постепенно увеличивают минерализацию к центру, на юг и юго-запад Бухаро-Каршинского артезианского бассейна (до 200 г/л и более).

Из представленного на рис. 1 видно, что каждая структура отличается обособленными гидрогеохимическими условиями, то есть гидрогеохимической зональностью [3]. Основной целью исследований является установление формирования скандия в указанных обособленных условиях, приуроченных к рассолам.

В целом формирование скандия можно рассматривать в двух аспектах, то есть исходя из гидрогеохимической зональности и геохимического барьера. Анализ многолетних исследований Денгизкульского поднятия показывает, что каждая нефтегазоносная структура характеризуется обособленной гидрогеохимической зональностью. То есть каждая структура характеризуется избирательной чувствительностью к геохимическим элементам.

В тектонофизическом отношении гидрогеохимические условия развиваются в рамках адвективных структур, состоящих из двух блоков, различающихся по физическим свойствам горных пород, в том числе инверсией плотностных свойств [1]. При этом

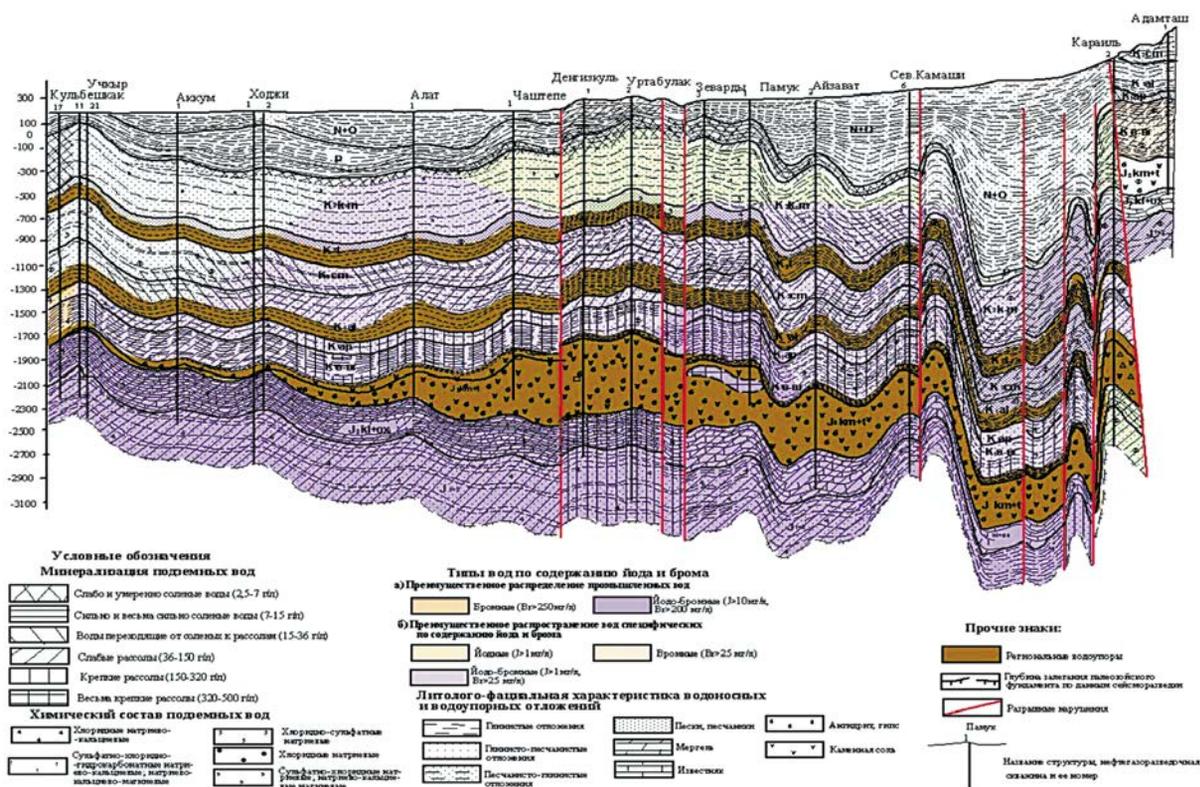


Рисунок 1. Геолого-гидрогеохимический разрез Бухаро-Каршинского артезианского бассейна по линии Кульбешкак-Адамташ [3]

водоносные горизонты приурочены к разуплотненному приподнятому блоку, тогда как опущенный блок отличается уплотненностью. Разуплотненная зона представлена трещиноватыми отложениями и чутко реагирует на деформационные явления, приводящие к движению жидкой среды.

В рамках тектонодинамических процессов, вызванных лунно-солнечными приливами-отливами, происходит циркуляция жидкой фазы верх-вниз, обеспечивающая процесс водообмена по вертикали [5]. Именно это явление обеспечивает локальность водообменных процессов, тем самым благоприятствуя образованию обособленности гидрогеохимической зональности.

Рассмотрим формирование скандия в рассолах.

Следует отметить, что водоносные горизонты отличаются пьезометрическим напором, который оказывает существенное влияние на водообменные процессы за счет термобародиффузии [2]. В дальнейшем потребуется установить особенность формирования химического состава микрокомпонентов в геохимическом барьере, образованном в обособленных гидрогеохимических условиях. При этом основным моментом является установление парагенетической ассоциации элементов. По этому направлению можно отметить исследования С.Л. Шварцева и др. (1992, 2005) [2].

Парагенетическая ассоциация элементов в различных геохимических условиях определяется по интенсивности миграции элементов. На этой основе разработана типизация концентраций элементов исходя из окислительно-восстановительных процессов, происходящих в водной среде, в различных физико-химических условиях, в том числе щелочно-кислотных свойств – pH.

В работе С.Р. Крайнова и др. [4] показано, что концентрацию элементов также можно оценить с помощью зависимости коэффициента равновесия и параметра

электроотрицательности. В этом случае особую роль играют лиганды анионов, которые тесно связаны с катионами микрокомпонентов.

Таким образом, эти подходы дополняют друг друга в определении состава скандия и сопровождающих элементов. Значения pH служат качеством равновесного параметра, при котором достоверно устанавливается выбранная парагенетическая ассоциация элементов (рис. 2).

Предложенная нами методика апробирована при обработке результатов химического анализа по отдельным структурам Бухаро-Каршинского артезианского бассейна (Кокдумалак, Северный Уртабулак, Крук). Длительное изучение химического состава рассолов показывает, что скопление в них химических элементов носит полигенный характер. Следовательно, совместное их нахождение можно рассматривать на примере кластерного анализа. Элементы, изученные в ходе работы, как правило, характеризуются тесной корреляционной связью. В результате были установлены корреляционные связи между скандием и сопровождающими его элементами. К примеру, на месторождении Кокдумалак высоким коэффициентом корреляции отмечаются следующие элементы: Ni – 0,88, Cu – 0,81, Cr – 0,77, Co – 0,75, Li – 0,73, Br – 0,71, V – 0,67, Zn – 0,63, Sr – 0,62, Ti – 0,62, As – 0,55.

Особый интерес представляет следующий этап исследований – обоснование парагенетической ассоциации данных элементов в рассолах с точки зрения геохимических барьеров, описанные Крайновым С.Р. и Шварцевым С.Л. в своих трудах [2, 4]. В соответствии с этим формирование скандия в подземных водах в пределах Бухаро-Каршинского артезианского бассейна протекало в глеевой среде, где pH изменяется

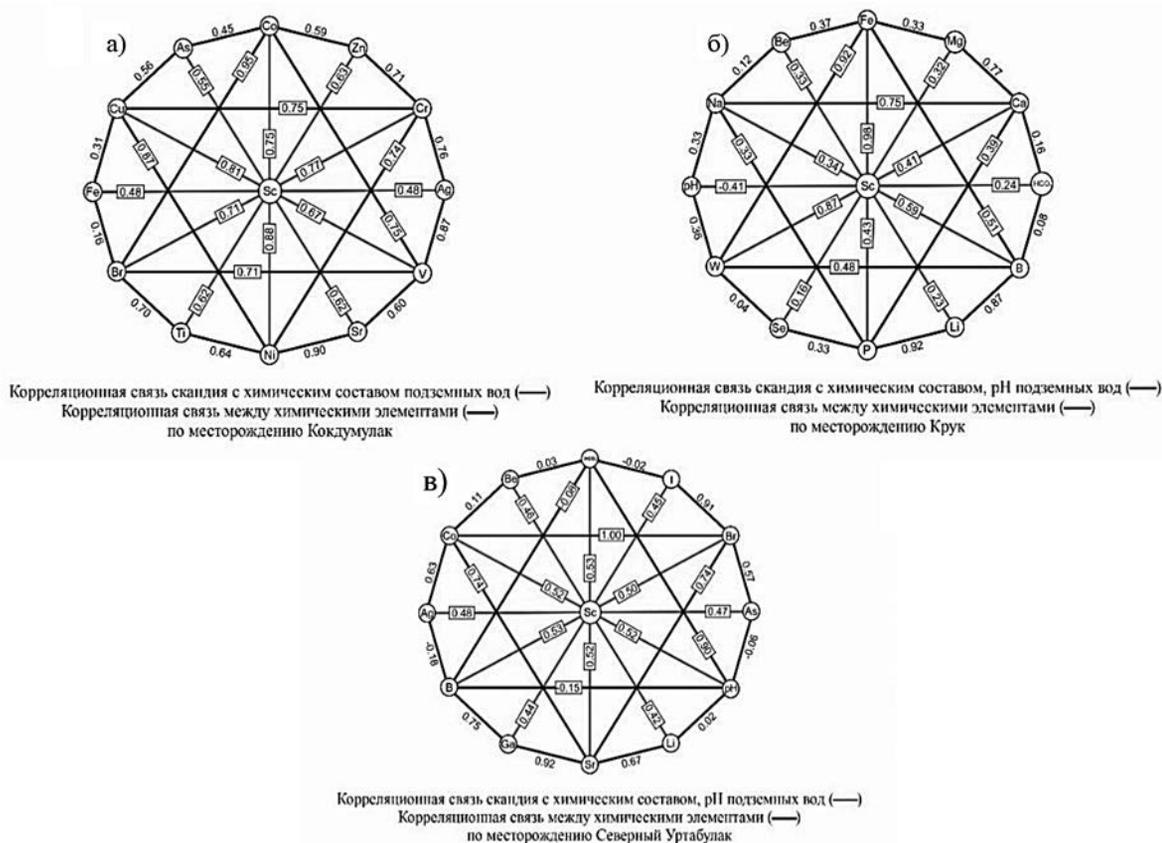


Рисунок 2. Корреляционная связь скандия с химическим составом, pH подземных вод по месторождениям: а) Кокдумалак; б) Крук; в) Северный Уртабулак

от 6,5 до 8,5. Согласно разработанной классификации, развитие парагенетической ассоциации происходило ступенчатым образом. Процесс радиолиза, благоприятствующий выделению кислорода, занимает важное место в развитии окислительных процессов в глеевой среде. Также следует отметить, что содержание урана благоприятно действует на развитие радиолиза и скопление скандия. Согласно таблице «Типы концентраций элементов на геохимических барьерах» [4], в окислительной среде выделяются такие элементы, как Fe и Co. Окислительная среда содействует разложению комплексных соединений. При этом восстановительные процессы, способствующие скоплению элементов в геохимическом барьере, представляют наибольший интерес.

В дальнейшем скопление вышеуказанных элементов происходит за счет сорбционных процессов в слабой щелочной среде, которая характеризуется присутствием таких элементов, как стронций (Sr), цинк (Zn), барий (Ba), кобальт (Co), никель (Ni), имеющих между собой высокую степень корреляционной связи.

Группа указанных элементов в большей степени приурочена к гидрооксокомплексной группе. Как правило, гидрооксокомплексы отличаются 8-электронной орбитой и высокими значениями электроотрицательности. В развитии гидрооксокомплексов не последнюю роль играет соединение OH, которое служит лигандом анионов, удерживающей, благодаря Кулоновой силе, катионы указанных микрокомпонентов [4]. В координационной системе константа диссоциации (pK) и электроотрицательность (ЭО) элементов находятся в определенной закономерности, тем самым подтверждая их совместное нахождение (рис. 3).

Показатель pH служит равновесной компонентой, снижение которого при образовании гидрооксокомплексов обуславливается участием OH в химическом процессе. Установлено, что со снижением pH наблюдается повышение содержания скандия и сопровождающих элементов, что подтверждается отрицательной корреляционной связью Sc и pH (-0,14). Данное поведение скандия было проверено на разных месторождениях Бухаро-Каршинского артезианского бассейна (Крук, Северный Уртабулак, Кокдумалак, Восточный и Западный Ташлы). Отметим, что среднее содержание скандия на площадях Восточный и Западный Ташлы составило всего 0,85–1,26 мкг/л, и в то же время показатель pH равен 8,2–8,4. На площадях Крук, Северный Уртабулак,

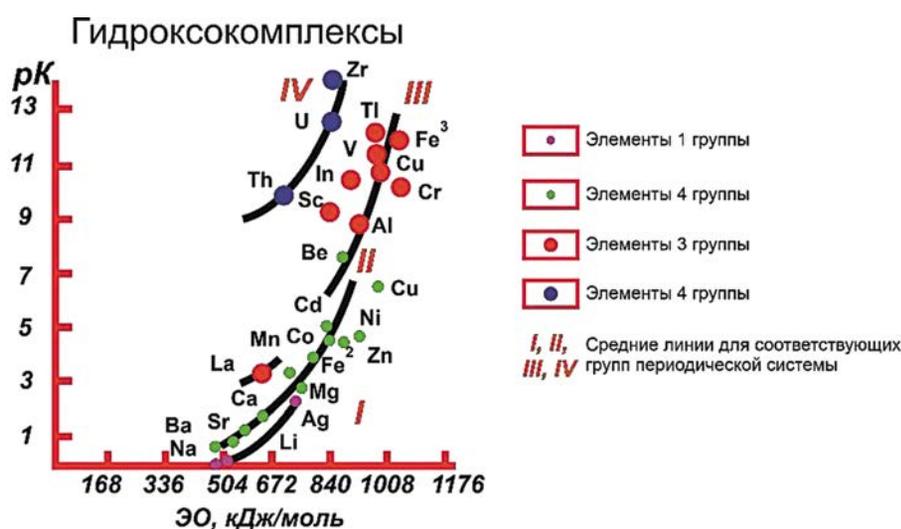


Рисунок 3. Связь устойчивых комплексных соединений элементов pK (константа диссоциации) с их электроотрицательностями для соединений с преобладанием ионной связи [4]

Кокдумалак наблюдается обратная картина: среднее содержание скандия 15,97, 7,26, 9,92 мкг/л соответственно, а показатель рН равен 6,9–7,3.

Выводы:

Заключительный этап формирования подземных вод, имеющих в своем составе полезные компоненты, характеризуется неотектонической активизацией. Образование сквозных структур, связанное с этим процессом, способствует скоплению микрокомпонентов в основном водоносном горизонте. Тектонодинамический процесс, охватывающий палеозойские, альпийские и неотектонические структуры, благоприятствует функционированию описываемой системы. Можно говорить о большом влиянии тектонических процессов на формирование химического состава при образовании обособленных гидрогеохимических зон.

Формирование скандия происходит в комплексе элементов, отличающихся устойчивыми связями. При этом устойчивость определяется тесной корреляционной связью между элементами в рессолах.

Формирование скандия можно рассматривать в рамках геохимического барьера, установленного С.Л. Шварцевым и С.Р. Крайновым. Развитие процесса радиолитизации, связанное с присутствием урана и благоприятно влияющее на окислительные процессы, содействует скоплению скандия. Концентрация скандия и сопровождающих элементов происходит в слабой щелочной среде при росте значений гидроокисла (ОН). Это оказывает влияние на рН-показатель – там где происходит его снижение, наблюдается высокое содержание скандия.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Албул С.П. Рудопоисковая гидрогеохимия. – М.: Изд-во УДН, 1969. – 343 с.
- 2) Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода. В 5 т. Т.1: Система вода–порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / В.А. Алексеев и др.; отв. редактор тома С.Л. Шварцев; ОИГГМ СО РАН. Издательство СО РАН, 2005. 244 с.
- 3) Бакиев С.А. Промышленные воды Узбекистана и перспективы их использования. – Ташкент: ГИДРОИНГЕО, 2012. 140 с.
- 4) Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / Крайнов С.Р. и др. 2-е изд. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 672 с.
- 5) Тектонодинамические и тектонофизические принципы формирования термоминеральных и промышленных вод и их поисковые критерии / Р.А. Турсунметов и др. // Международная научно-практическая конференция «Геология Средней Азии: состояние изученности и перспективы развития» / Том 2, г. Навои, Республика Узбекистан, 2022. С. 197–202.

РЕДКИЕ ЗЕМЛИ В ЖЕЛЕЗНЫХ РУДАХ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО ПОЯСА

*Домаренко В.А. – 1, Перегудина Е.В. – 2, Кенесбаев Б.К. – 2, Пшеничкин А.Я. – 2
1 – ЗСО РАЕН, 2 – ФГАОУ ВО НИ ТПУ*

Дискуссия о возможности и целесообразности промышленного освоения открытых в середине прошлого века Бакчарского и Колпашевского железорудных узлов крупнейшего в мире Западно-Сибирского пояса продолжается уже более полувека.

Ещё в 1964 году в Сибирском отделении РАН группа авторов опубликовала известную монографию «Западно-Сибирский железорудный бассейн», в которой дана общая характеристика этого уникального геологического объекта, позволяющего при условии его промышленного освоения обеспечить железорудным сырьём все существующие металлургические предприятия Урала и Сибири, а также создать новые центры чёрной металлургии в восточной части страны.

Были выполнены геолого-технологические и технико-экономические расчёты возможности добычи различными способами от 10 до 30 млн т железной руды ежегодно, а также показана принципиальная возможность получения из этой руды качественных концентратов, окатышей и торфорудных брикетов [6–8].

Предполагалось даже строительство собственного металлургического комплекса с использованием железной руды и торфа в качестве местного энергетического сырья этого месторождения, но после строительства второго металлургического комбината ЗСМК в г. Новокузнецке и открытия Соколовско-Сарбайского железорудного месторождения в Казахстане Бакчарский объект необоснованно перевели в статус бесперспективного и неопределённо-резервного на многие десятилетия.

В связи со значительной выработкой запасов сибирских месторождений железной руды и необходимостью импортировать её из ближнего и дальнего зарубежья, вопрос об увеличении сырьевой базы чёрной металлургии Урала и Сибири в последние годы становится особо актуальным.

С целью кардинального изменения логистики, переработки и транспортировки железорудного сырья, его максимального приближения к существующим и новым металлургическим предприятиям восточных регионов страны в течение последних 10 лет были возобновлены поисково-оценочные работы на двух участках Бакчарского рудного узла [4,5]. Были предприняты две попытки оценки этого узла геологами-производственниками, однако обе закончились неудачей, ни одного килограмма запасов руды на учет не поставлено. Причина кроется в низкой квалификации геологов, производящих работы, и их научных кураторов.

Следует отметить, что к первооткрывателям объекта в шестидесятых годах прошлого столетия претензий нет. Они не смогли сделать месторождение по техническим причинам. Современники же, в силу объективных и субъективных обстоятельств, не смогли поставить объект на баланс, в связи с чем перспективы освоения будущих месторождений в сложившейся обстановке весьма туманны.

Несмотря на это, результаты выполненных работ позволяют предполагать, что руды этого объекта могут не только решить проблему дефицита местного сырья и полностью обеспечить существующие металлургические производства, но и стать принципиально новым центром современной высокорентабельной металлургии. В работе обращается



внимание на то, что попутно получаемые фосфат-шлаки смогут полностью покрыть всю потребность Сибири в фосфорных удобрениях, а попутно извлекаемые редкоземельные компоненты в разы увеличивают его ценность. При этом себестоимость добываемой руды, за счёт минимальных транспортных затрат, может оказаться значительно ниже себестоимости руды существующих в настоящее время железорудных предприятий, а нынешние поставки ЖРС из европейской части страны могут быть переориентированы на экспорт, что значительно повысит валютные поступления в бюджет страны, как это практикуется во всемирно известной газовой отрасли.

Основные особенности состава и строения рудной толщи

В основу классификации оолитовых руд Бакчарского рудопроявления взяты особенности минерального состава и текстурно-структурные особенности руд. Все руды делятся на две группы: сыпучие и цементированные. Внутри группы выделяются типы по минеральному составу цемента (рис. 1):

I. Оолитовые сыпучие руды

– руда гидрогетитовая оолитовая сыпучая с гидрогетит-глинистым цементом;

II. Оолитовые цементированные руды

– руда гидрогетитовая оолитовая, крепко цементированная сидеритовым цементом;

– руда гидрогетитовая оолитовая, слабо цементированная хлорито-глинистым цементом;

– руда гидрогетитовая оолитовая с гидрослюдистым цементом;

– руда гидрогетитовая оолитовая с сидерит-хлоритовым цементом [3].

В единичных количествах в рудах встречаются: магнетит, гематит, ильменит, пирит, вивианит, эпидот-цоизит, роговая обманка, гранаты, ставролит, циркон, рутил, анатаз, лейкоксен, сфен, дистен, андалузит, силлиманит, апатит кластогенный и аутигенный редкоземельный фосфат.

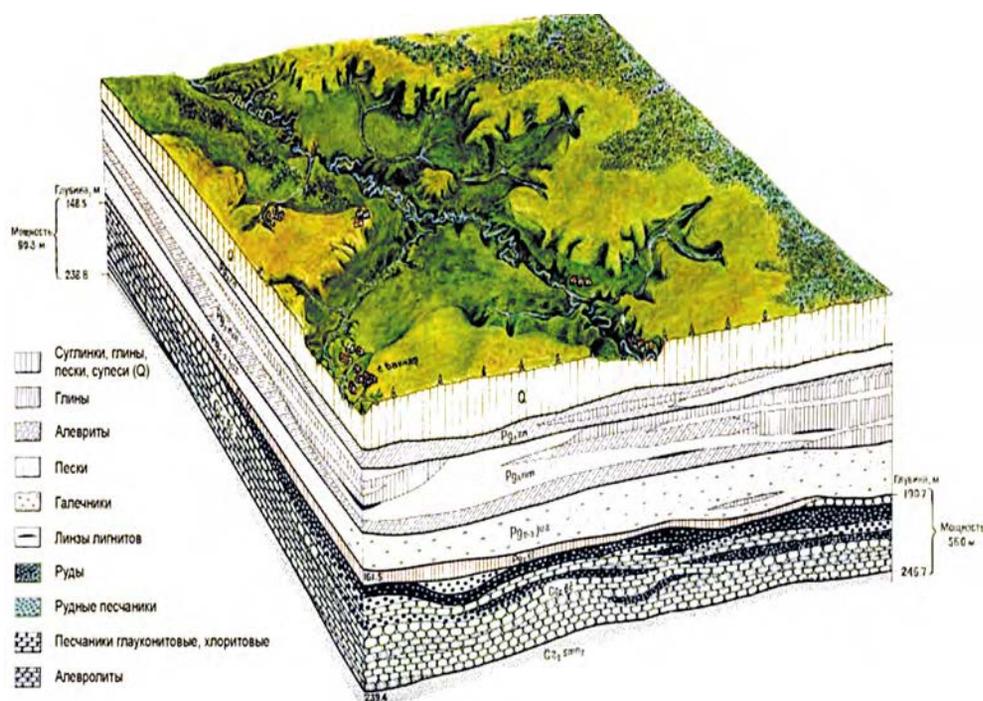


Рисунок 1. Блок-диаграмма Бакчарского железорудного узла

Данные химического состава керновых проб по интервалам показывают, что содержание железа во всех горизонтах составляет 20–40 %, что значительно меньше, чем необходимо для непосредственной доменной плавки руд; нерудная примесь в руде преимущественно кислая, т. е. состоит почти исключительно из кремнезема. Содержание серы и мышьяка в руде не превышает допустимые значения. Фосфора содержится больше, чем предусматривают кондиции. Его содержания напрямую коррелируются с содержаниями редких земель цериевой группы. Руды практически не содержат медь, цинк, свинец, никель и хром, кобальт, титан. Из полезных примесей присутствует ванадий, содержание которого значительно для железных руд.

Особенности распределения элементов-примесей в рудной толще

Исследователи разных лет обращали внимание на то, что гидрогенный характер образования оолитовых железных руд западной Сибири может сопровождаться накоплением в них редких элементов, благородных металлов, а также урана и тория. Так, Г.М. Шором и соавторами были отмечены повышенные содержания в железных рудах бассейна Pd (до 71 мг/т), Ir (до 27 мг/т), Ag (до 2,5 г/т). Источником сноса металлов, по их мнению, являлся Алдано-Североземельский платиноносный пояс [4].

О комплексном характере оруденения также говорится в работах А.Я. Пшеничкина и В.А. Домаренко [4,5]. В своих исследованиях, помимо благородных металлов, они отмечают в некоторых скважинах повышенные концентрации редких и рассеянных (до 60 мкР/ч). Повышенные концентрации некоторых редких элементов также были отмечены Асочаковой Е.М., Карепиной К.В. [1,4].

Авторами [1–5] были изучены минеральные формы нахождения редкоземельных элементов, которые концентрируются в редкоземельных фосфатах (монацит, куларит). Долго тянувшаяся дискуссия о промышленной значимости этих элементов продолжается и сегодня.

Эти элементы могут служить природно-легирующими компонентами руд. Также отмечаются надкларковые значения некоторых лантаноидов, иттрия, скандия, вольфрама, сурьмы и тория. Средние содержания этих элементов в рудах представлены на рис. 2 и 3 и в табл. 1. Отмечается, что лантаноиды концентрируются в редкоземельных фосфатах, которые равномерно распределены в структурах железистых оолитов (рис. 4) и будут отделяться от железного расплава при переделе и уходить в шлак.

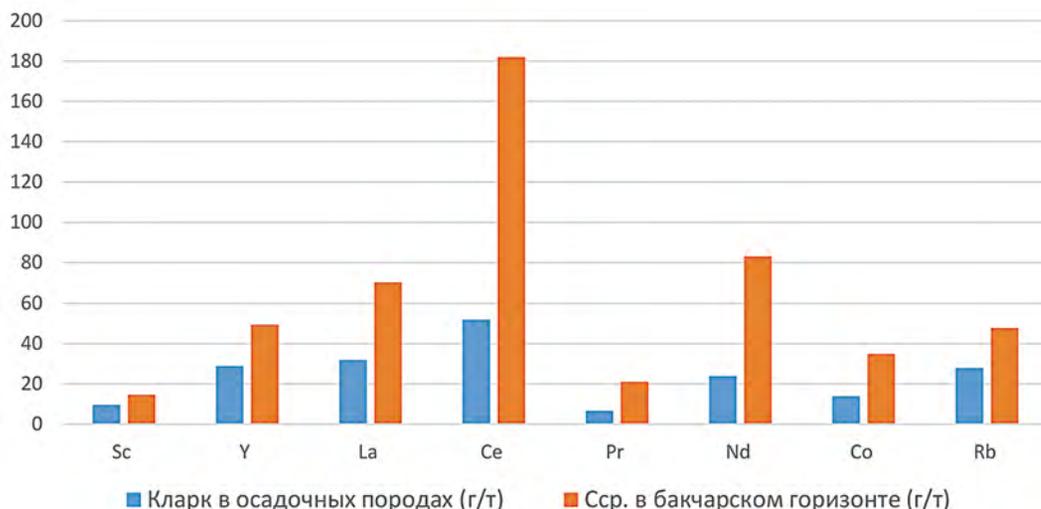


Рисунок 2. Среднее содержание лантаноидов, а также Sc, Y и Co в пробах Бакчарского железноносного горизонта

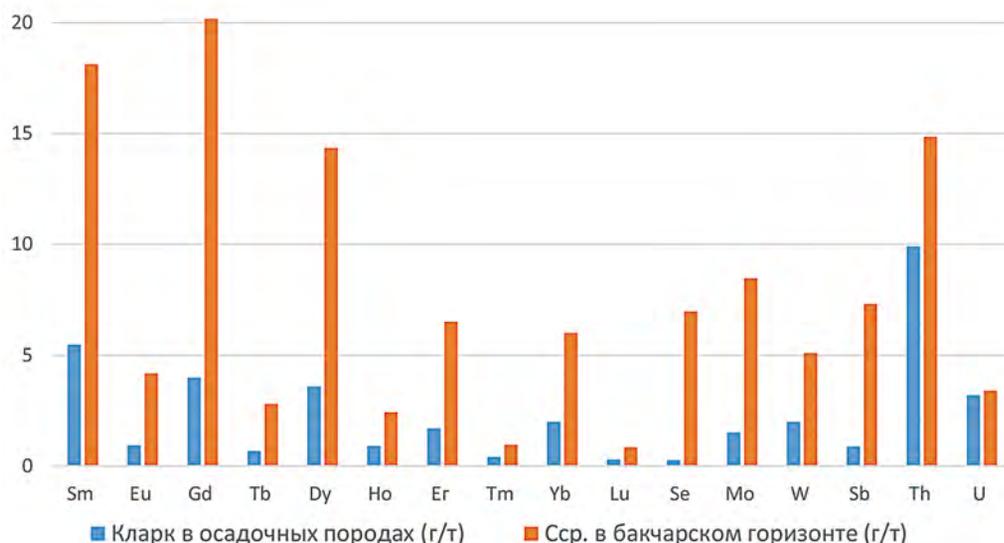


Рисунок 3. Среднее содержание лантаноидов, радиоактивных элементов, а также W, Mo, Se, Sb

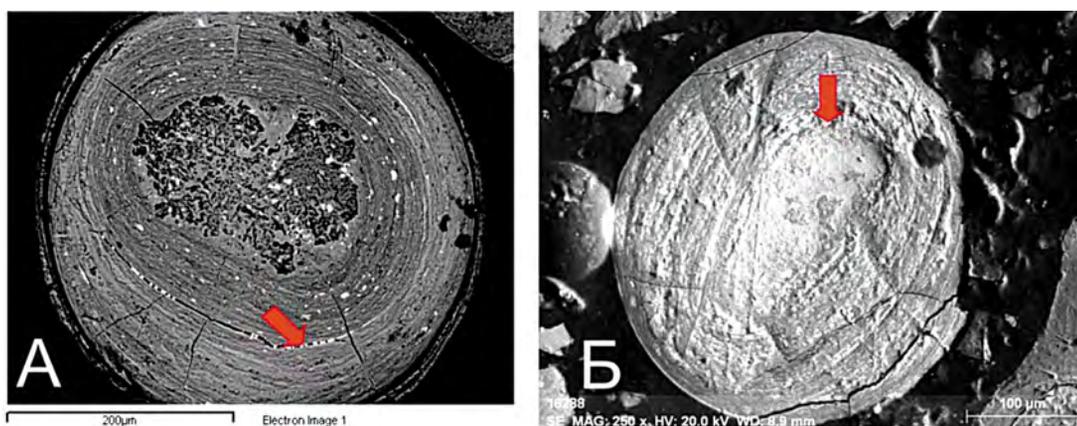


Рисунок 4. Оолит гидрогетитового состава с выраженным ритмично-зональным строением; чередование ритмов подчеркивается отложениями фосфатов РЗЭ (белое на снимке) (А – фото Башлыковой Т.В., Б – фото автора)

Таблица 1

Химический состав фосфатов РЗЭ [2]

№ п/п	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃
1	16,6	2,53	37,69	13,63	5,10	5,93	1,80	0,59
2	24,64	3,16	20,20	19,70	6,40	8,73	1,40	1,03
3	29,72	4,05	8,56	26,45	10,20	9,25	1,74	1,36
4	20,93	2,87	28,0	17,79	6,59	6,30	1,43	0,62
5	11,29	1,75	51,71	8,34	2,80	2,80	–	–
6	19,25	2,7	27,6	17,24	5,85	6,05	1,27	1,2
№ п/п	Al ₂ O ₃	SiO ₂	V ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	сумма	–
1	2,94	1,67					88,48	–
2	2,09	1,39					88,74	–
3	0,28	0,06					91,67	–
4	0,73	1,05					86,31	–
5	2,45	2,22	0,15	0,45	0,1	0,1	84,16	–
6	2,34	4,0	–	0,4	0,42	–	88,41	–

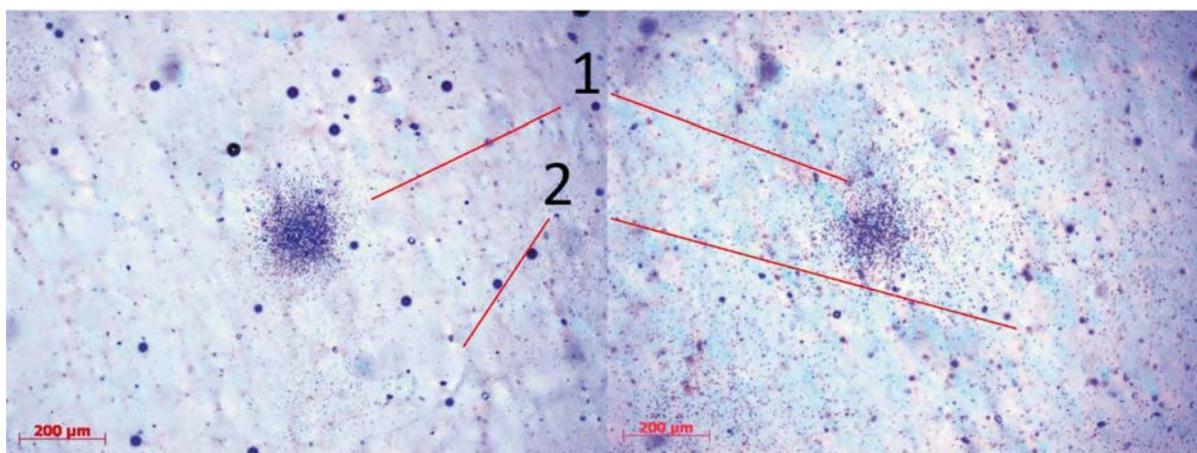


Рисунок 5. Результаты осколочной радиографии. 1 – сгущение треков над радиоактивными минералами, 2 – равномерное рассеивание радиоэлементов; проходящий свет, увеличение $\times 20$ (фото автора)

Оценка прогнозных ресурсов

Оценка прогнозных ресурсов железных руд Бакчарского рудного узла выполнена в контурах Бакчарского лицензионного участка (530 км^2) и в контурах рудного узла (1200 км^2) для всех типов железных руд (рыхлых и разной степени цементированных) методом геолого-математического моделирования с построением блочной модели при помощи программного продукта «MicroMine».

Согласно Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых и Методическим рекомендациям по применению Классификации запасов к месторождениям железных руд, руды Бакчарского узла характеризуются относительно сложным строением и достаточно выдержанным качеством руд, объект соответствует месторождениям 2-й группы сложности геологического строения [5].

По аналогичной схеме произведена оценка прогнозных ресурсов фосфора, РЗЭ и отдельно церия на данной площади. Построены блочные модели по горизонтам (рис. 7).

Таблица 2

Показатели изменчивости основных свойств оруденения для определения группы сложности геологического строения

Коэффициент рудоносности K_p	0,86
Показатель сложности q	0,77
Коэффициент вариации мощности V_m	39,8%
Коэффициент вариации содержания железа V_c	18,2%

Таблица 3

Ресурсы железа в рудных залежах Бакчарского узла

Лицензионный участок. Рудное тело	Объем (м^3)	Объемная масса ($\text{т}/\text{м}^3$)	Рудная масса (млн т)	Ресурсы металла P_1 (млн т)
Н	438376660,6	2,3	1008,3	675,5
К1	4010936045	2,3	9225,1	3044,3
К2	2345030837	2,3	5393,5	1779,9
Б (рых)	752285445	1,9	1429,3	471,7
Б (сцем)	1961515805	2,3	4511,4	1488,8

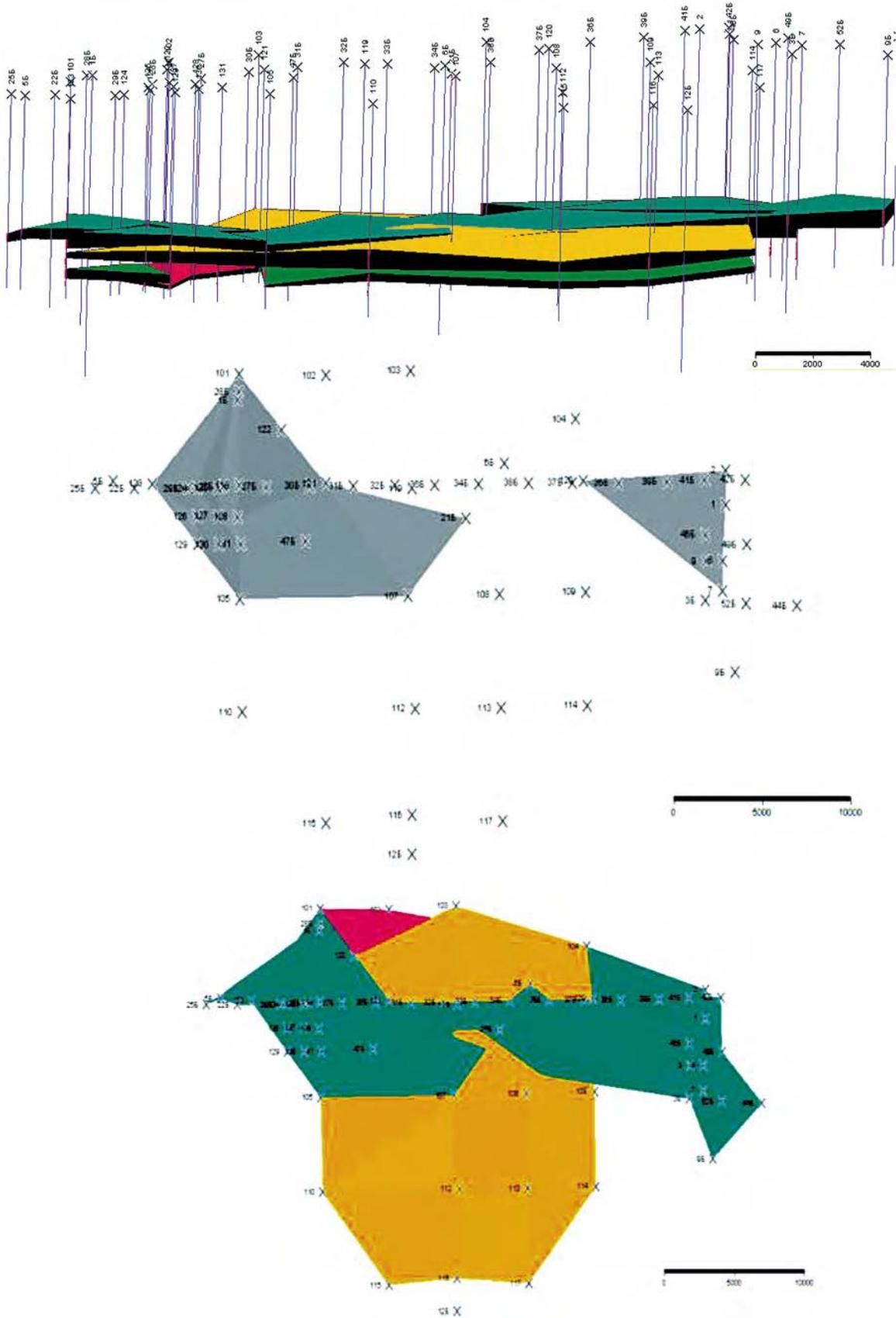


Рисунок 6. Характер распределения железа по горизонтам

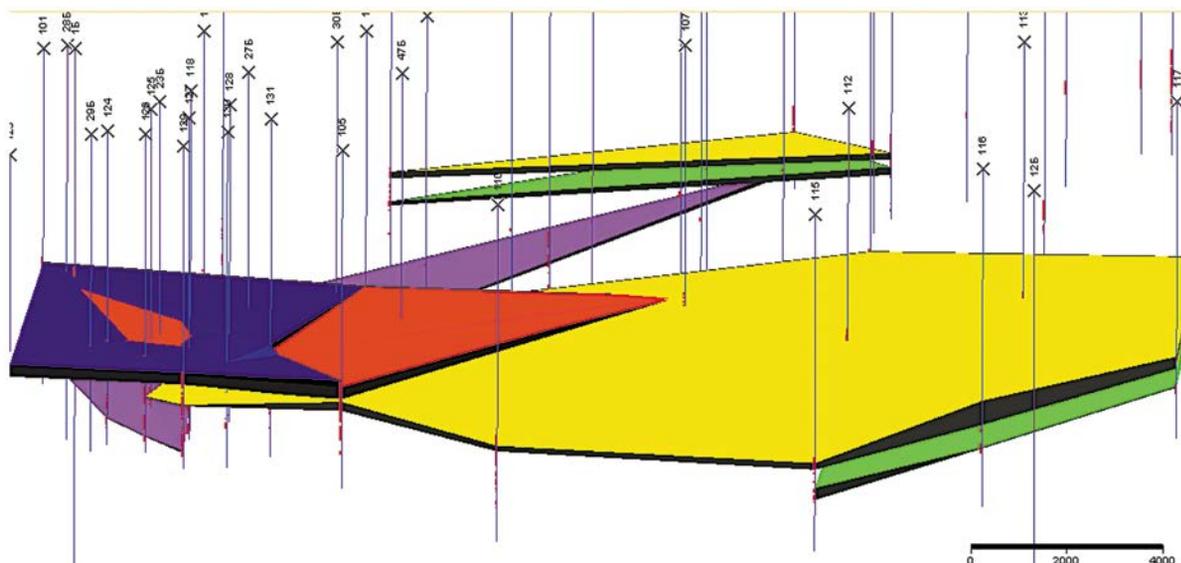


Рисунок 7. Пространственное распределение фосфора и РЗЭ в железорудных горизонтах

Таблица 4

Результаты подсчета прогнозных ресурсов фосфора, РЗЭ и церия в Бакcharском рудном узле

	Содержание, %	Ресурсы металла P ₁ (млн т) (530 км ²)	Ресурсы металла P ₂ (млн т) (1200 км ²)
Фосфор	0,27	13,1	29,6
РЗЭ	0,05	2,4	5,4
Церий	0,03	1,4	3,1

Оценка прогнозных ресурсов по фосфору, РЗЭ и церию приведена в табл. 4. Рудная масса составила 4875,9 млн т.

Таким образом, нами выявлена прямая корреляция между содержаниями фосфора и редких земель, находящихся в куларите.

По металлогеническому потенциалу железа и редких земель объекты Западно-Сибирского пояса являются крупнейшими в мире.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Асочакова Е.М. К геохимии оолитовых железных руд Бакcharского месторождения (Западная Сибирь) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XI Междунар. симпозиума им. М.А.Усова студентов и молодых ученых. Томск: ТПУ, 2007. С. 51–53.
- 2) Башлыкова Т.В. Металлургическая оценка и обоснование рациональной технологии переработки железной руды Бакcharского проявления // М., 2009.
- 3) Гринёв О.М., Григорьева Е.А., Тюменцева Е.П. Лито-геохимическая характеристика основных типов железных руд Бакcharского месторождения // Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых. Томск, 2010. 189 с.
- 4) Домаренко В.А., Тепляков И.М., Молчанов В.И. Возможности подземного выщелачивания с использованием минеральных кислот при разработке месторождений Западно-Сибирского железорудного бассейна // Тр. КНИИГиМС, г. Красноярск, 2001.
- 5) Домаренко В.А., Кенесбаев Б.К., Перегудина Е.В. Оценка ресурсного потенциала комплексных железо-редкоземельных руд Бакcharского рудного узла на основе компьютерного мо-

- делирования (Томская область). В сб. «Материалы VI международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». 2021. С. 173–182.
- 6) Западно-Сибирский железорудный бассейн. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1964. 448 с.
- 7) Николаева И.В. Бакчарское месторождение оолитовых железных руд. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1967. 129 с.
- 8) Павлов Д.И., Карцев А.А. Зоны катагенной разгрузки подземных вод нефтегазоносных бассейнов и осадочный рудогенез // Геология рудных месторождений. 1995. Т. 37, № 2. С. 122–132.

БЕРИЛЛИЙ: ПРОДУКТОВЫЙ БАЛАНС, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ

Дьяченко А.Н.

*МИРЭА-Российский технологический университет
dyachenko@mirea.ru*

Бериллий – удивительный металл. Он в 1,5 раза легче алюминия и в 9 раз его твёрже, а изделий из бериллия меньше в 15 раз аналогичных изделий из алюминия. Металлический бериллий является т.н. стратегическим металлом, без которого невозможно развитие авиации, космической, лазерной, рентгеновской и атомной техники. Однако в этих областях применяется не более 10 % произведённого бериллия. 80 % бериллия идёт на производство сплавов с медью, ещё 10 % – сплавы с алюминием и керамика из оксида бериллия. Добавка 1,5–2 % бериллия в медь позволяет создать уникальный сплав – бериллиевую бронзу. Это основной коммерческий продукт потребления бериллия. Такого сочетания высокой упругости, высокой коррозионной стойкости и хорошей электропроводности не имеет больше ни один из промышленных сплавов. Она применяется при изготовлении неискрящих инструментов для использования во взрывоопасных средах. Пружинные и рессорные механизмы из бериллиевой бронзы обладают 1000-кратным ресурсом актов сжатия-разжатия относительно аналогичных стальных. Мировой рынок изделий из бериллиевых бронз составляет около 2 млрд долларов.

Всего в мире из первичного сырья производится около 300 т бериллия в год, с учётом рециклинга вторичного сырья – около 450 т в год. Только три государства в мире имеют бериллиевое производство: США, Казахстан и Китай [1, 2].

США – основной производитель бериллия, имеют долю на рынке около 70 % (200 тонн) и полностью обеспечивают производство собственным сырьём. В 2011 году американский производитель бериллия Materion полностью обновил производственные мощности и запустил новый бериллиевый цех производительностью около 70 т/г. Площадь пятна застройки 4 750 м², площадь помещений 11 000 м². Капитальные вложения оцениваются в сумму до 100 млн долларов, доля государственного участия – 75 %.

Китай имеет долю производства бериллия около 10 % (30 т/г). В 2005 году Китай полностью модернизировал своё производство и построил новый завод производительностью до 50 т/г бериллия (с учётом рециклинга). Капитальные вложения в новое производство оцениваются в 60 млн долларов, доля государственного участия – 100 %. Завод был построен компанией Fuyun Hengsheng Beryllium Industry Co., Ltd., являющейся совместным предприятием компаний Nonferrous Metals Industry Group,

Xinjiang Henghe Investment Co., Ltd. и Xinjiang Nonferrous Metals Industry Group Nonferrous Metals Co.

Казахстан – одна из трёх стран–производителей бериллия, имеет долю на мировом рынке до 20 %. Производство полного цикла от переработки сырья до выплавки лигатуры реализовано на Ульбинском металлургическом заводе (АО «УМЗ», НАК Казатомпром). Основной проблемой казахстанского производства является отсутствие собственной минерально-сырьевой базы. До настоящего времени АО «УМЗ» пользуется остатками сырья, поставленными ещё в конце 80-х годов с Ермаковского месторождения (Респ. Бурятия).

Важной технологической особенностью бериллиевого производства на АО «УМЗ» является потребность в двух видах сырья: фторидного и оксидного. Технология основана на сернокислотном способе производства, разработанном фирмой Materion для берtrandита и усовершенствованной ВНИИХТ в 60-х годах XX века под российское фенакит-флюоритовое сырьё [3]. Недостатки сернокислотного способа при переработке флюорит-фенакит-берtrandитового концентрата (ФФБК): невозможность использовать только высокофтористое сырьё, проблема утилизации фторсодержащих газов SiF_4 , необходимость предварительной высокотемпературной обработки 1700 °С, многостадийная очистка, невозможность коммерческого выделения флюорита CaF_2 .

Для решения этих проблем высокофтористое ермаковское сырьё шихтуют с оксидным сырьём Малышевского месторождения. В настоящее время особые проблемы возникают именно с поставками оксидного сырья.

Поскольку после распада СССР Казахстан пользовался огромными запасами уже поставленного сырья, то и добыча нового сырья на Ермаковском месторождении была прекращена, обогатительная фабрика ликвидирована. В настоящее время лицензией на недропользование владеет ГРК «Озёрная», однако добыча руды не ведётся по причине нерентабельности. Для производства 100 т/г бериллия (30 % мирового рынка) необходима добыча всего около 30 000 т/г руды. Столь малое добычное предприятие не представляет интереса для бизнеса.

Основным стоп-фактором развития бериллиевого производства является разрыв бизнес-цепочки между добычным и металлургическим переделом. Производить отдельно руду (1 % BeO) убыточно, производить рудный бериллиевый концентрат (1 % BeO) нерентабельно. Чтобы создать полный цикл производства, необходимо или недропользователю вложить около 80 млн долларов инвестиций в металлургическое производство, или металлургам купить бериллиевое месторождение. Договориться не удаётся. Недропользователь владеет уникальным и лучшим в мире бериллиевым месторождением (Ермаковское), но стоимость этого месторождения можно оценить только из стоимости бериллиевой руды, которая формируется из расчёта 5 долларов за килограмм оксида бериллия в руде. Стартовую стоимость месторождения можно оценить из учета добычи руды за 1 год в пересчёте на металл в количестве 100 т бериллия по стоимости 5 долл./кг оксида бериллия в руде. Рассчитанная по таким правилам стоимость добытой руды за 1 год составит 500 000 долларов. При этом нужно понимать, что максимальная добыча руды не должна превышать эквивалент 100 т/г по бериллию, что составляет всего около 30 000 т руды в год. Малая производительность по руде делает добычу малорентабельной с высокой неконкурентной стоимостью полученного концентрата. Оставшиеся запасы бериллиевой руды в Ермаковском месторождении огромны. При добыче 100 т/г по бериллию (30 000 по руде) время эксплуатации рудника не менее 20 лет только по запасам категории C_1 . Рассматривался проект ускоренной добычи всего объёма руды категории C_1 и производства бериллиевого

концентрата в течение 2–3 лет, но реализация концентрата в РФ в таком объёме невозможна. Продажа всего добытого сырья за границу приведёт к полной потере бериллиевой сырьевой базы в РФ.

Параллельно с планами развития Ермаковского месторождения в РФ существуют планы развития Малышевского месторождения. ГК Ростех презентовала в августе 2019 года проект «Создание производства металлического бериллия на АО «Мариинский прииск» [4]. Однако информации о дальнейшем развитии этого проекта нет, возможная остановка проекта связана с низким содержанием бериллия (до 0,1 %) на Малышевском месторождении по сравнению с 1,2 % содержания оксида бериллия на Ермаковском. Общие затраты на реализацию этого проекта оценивались в 22 млрд руб. с дисконтированным сроком окупаемости 26 лет.

Выгодный бизнес можно создать только при полном цикле от добычи руды до производства металла. Этому способствует мировая конъюнктура цен на бериллиевую продукцию, где на каждом новом переделе цена на бериллий в продукте увеличивается многократно:

- 5 долл./кг – бериллий в руде;
- 20 долл./кг – бериллий в концентрате;
- 320 долл./кг – стоимость бериллия в гидроксиде;
- 500 долл./кг – стоимость бериллия в металле;
- 900 долл./кг – стоимость бериллия в бронзе.

Первый рентабельный передел: производство фторобериллата или оксида (гидроксида) бериллия.

В 2013–2016 гг. в рамках Подпрограммы «Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов» Минпромторгом была профинансирована НИОКР «Разработка промышленной технологии переработки бериллиевых концентратов» (шифр «ЦОРМ», госконтракт № 13411.0924800.05.022 от 18.11.2013 г.). Результаты работ были опубликованы в российских научных журналах и защищены патентами РФ [5, 6, 7, 8].

Был разработан фтороаммонийный способ переработки концентрата Ермаковского месторождения, включающий следующие стадии:

- 1) вскрытие бериллиевого концентрата фторидом аммония;
- 2) выщелачивание бериллия в раствор;
- 3) очистка раствора;
- 4) получение тетрафторобериллата аммония;
- 5) дополнительная очистка;
- 6) получение фторида бериллия;
- 7) получение металла или гидроксида бериллия.

Фторидная технология позволяет перерабатывать высокофтористые руды и производить синтетический флюорит. Технологическая схема (рис. 1) отработана в лаборатории и на полупромышленном участке.

К сожалению, результаты работы «легли на полку» из-за отсутствия программы развития бериллиевого производства. Однако на основе российских разработок за рубежом начали активно публиковаться работы по новой технологии переработки бериллиевых концентратов [9, 10]. Началась гонка за внедрение новой технологии.

ГК Росатом имеет все необходимые компетенции для создания гидрометаллургической переработки сырья на площадке ПАО «ППГХО» в г. Краснокаменск. Интересы ГК «Росатом» в этом вопросе многогранны: это решение стратегической задачи по обеспечению РФ собственной бериллиевой продукцией; собственное производство фторида кальция, который сейчас импортируется; создание около 500 первичных рабочих

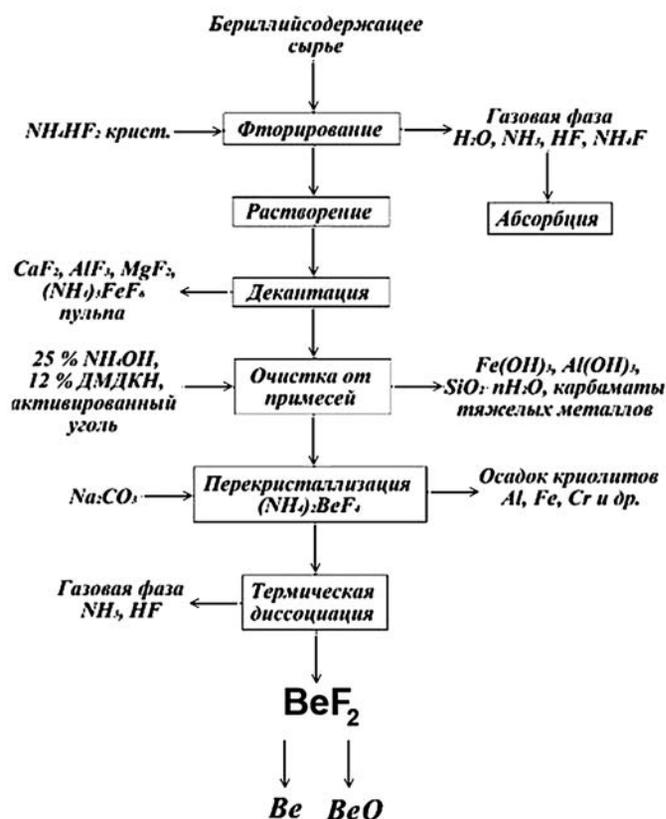


Рисунок 1. Технологическая схема производства фторо- бериллата аммония

мест в г. Краснокаменск; развитие забайкальского региона; получение прибыли до 20 млн долл./год только на производстве фторо- бериллата или гидроксида, или до 90 млн долл./год при полном цикле производства бериллиевой бронзы.

Необходимо отметить перспективность кооперации с АО «УМЗ» (Казахстан). Первичное производство фторо- бериллата аммония возможно организовать в РФ на площадке ПАО «ППГХО», а производство металла и лигатуры осуществлять на АО «УМЗ» (рис. 2). Такая кооперация позволит значительно снизить капитальные затраты для российской стороны и решить проблемы первичного передела для Казахстана. Взаимовыгодное сотрудничество очевидно. Остаётся договориться о цене фторо- бериллата.

В настоящее время казахстанские партнёры заинтересованы в приобретении у РФ бериллиевого концентрата. Однако при заявленной стоимости бериллиевого концентрата в размере 20 долларов за килограмм оксида бериллия в



Рисунок 2. Схема интеграции российского и казахстанского производства

концентрате такой бизнес для российской стороны невыгоден. Мы рискуем продать всю российскую минерально-сырьевую базу бериллия, что не соответствует нашей стратегической безопасности.

Российский рынок в настоящее время не может потребить более 40 т/г бериллия (в виде бронзы), однако производство, ориентированное только на российского потребителя, будет экономически нецелесообразно. Зарубежные партнёры готовы покупать у нас не только концентрат, но и бериллиевый полупродукт (фторобериллат аммония или гидроксид). Это не позволит нарушить мировой баланс бериллиевого бизнеса. Сотрудничество будет выгодно как российскому производителю полуфабриката, так и конечному зарубежному потребителю, никакие политические разногласия не мешают найти взаимную выгоду в бизнесе. В итоге Россия сможет решить стратегические задачи обеспечения специальных отраслей металлическим бериллием и решить проблему бериллиевого импортозамещения в народном хозяйстве (безискровой инструмент, токоразъемы, пружины). Общую бизнес-схему (рис. 3) можно реализовать только с привлечением зарубежных рынков сбыта бериллиевого полупродукта (фторобериллата аммония или гидроксида).

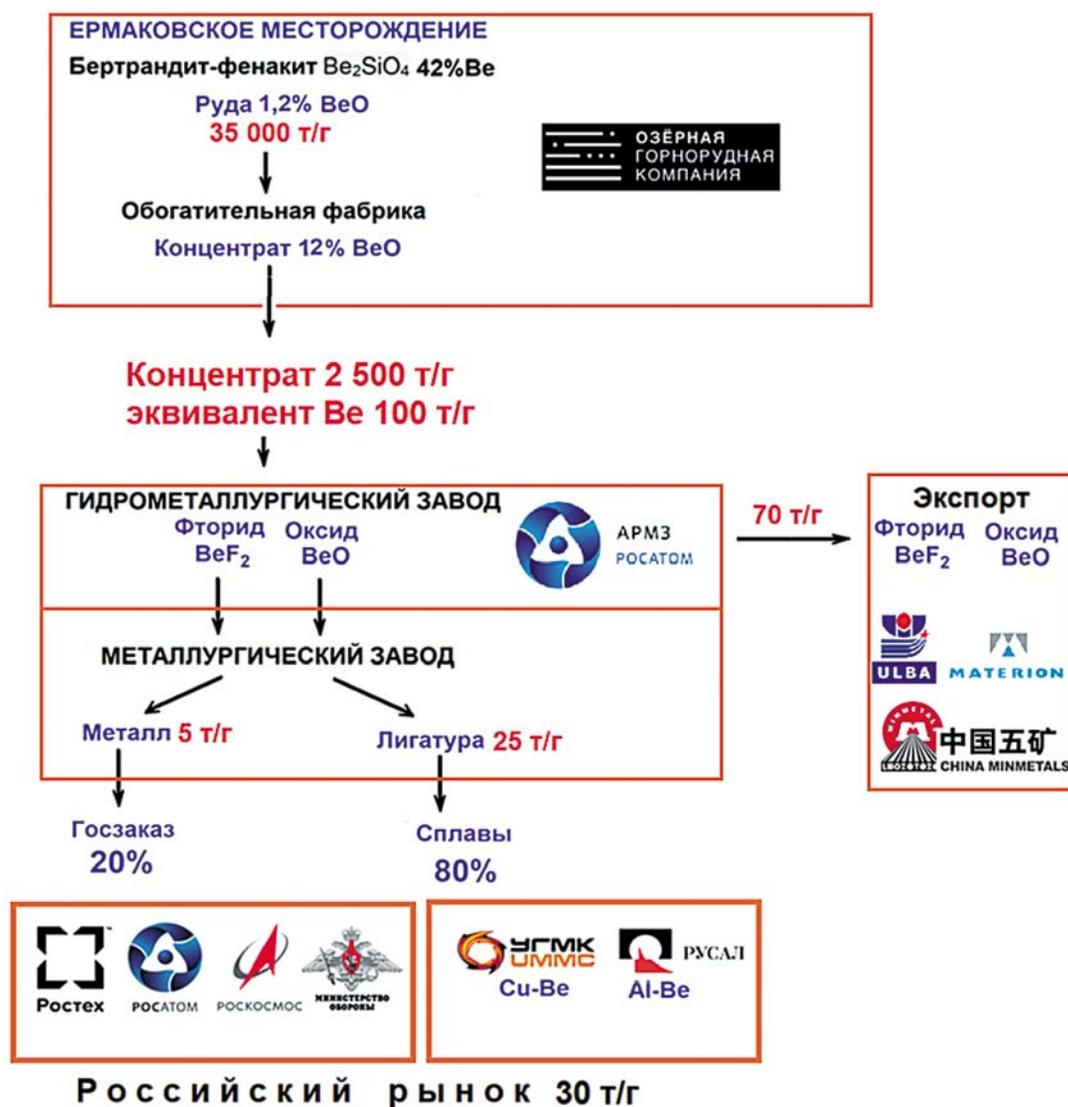


Рисунок 3. Бизнес-схема бериллиевых переделов

Предварительный анализ прибылей и убытков (табл. 1) на всём бериллиевом переделе показывает необходимость создания непрерывного бериллиевого бизнеса. Предварительные расчёты показывают, что производство концентрата неприбыльное, производство фторобериллата или гидроксида возможно организовать с прибылью до 15 млн долл./год при капитальных затратах (с учётом первичной добычи и обогащения) до 60 млн долл./год. Т. е. уже производство полупродуктов является весьма прибыльным, дальнейшие переделы ещё более экономически привлекательны.

Таблица 1

Анализ прибылей и убытков по бериллиевым переделам

Стадии	1	1а	2	3	4	5	6
Наименование передела	Добыча	Перевозка руды	Обогащение	Гидрометаллургия	Производство металла	Лигатура	Бронза
Предприятие	Ермаковское	РЖД	ППГХО	ППГХО	УМЗ	УМЗ	УГМК или РЕНОВА
Продукт	Руда	Руда	Концентрат	Гидроксид, фторид	Металл	Лигатура Си–Ве10	Бронза
Содержание Be, %	0,43		4,3	36	100	10	2
Объём производства, Эквивалент 100 т	35 000		2 500	250	100	1000	5 000
Стоимость бериллия в материале, долл./кг	5		20	320	500	700	900
Стоимость продукции, экв 100тонн в год	750 000		2 150 000	32 000 000	50 000 000	70 000 000	90 000 000 (без меди)
Прибыль, долл./год	–750 000	– 500 000	0	15 000 000	10 000 000	10 000 000	10 000 000

Несмотря на исключительную потребность в бериллии атомной и космической техники, нужно признать, что невозможно создать прибыльное производство бериллия только для нужд оборонно-промышленного комплекса. Потребность ВПК в бериллии оценивается в единицы т в год. При этом общее скрытое потребление бериллия в РФ оценивается в объёме около 40 т в год. Бериллий ввозится в РФ уже в виде готовых изделий: ресорное оборудование, высокотоковые контактные элементы, безискровый инструмент и др. Необходимо определиться: или мы создаём планово-убыточное производство только для нужд ВПК, или экономически обоснованное производство полного цикла, включая прокат бериллиевой бронзы и изделия из него для нужд гражданской экономики.

Для реализации российского бериллиевого проекта необходимо заложить в стратегию четыре ключевых концепции:

- 1) Производство и продажа рудного бериллиевого концентрата нерентабельна, что приведёт к полной потере РФ бериллиевого сырья.
- 2) Создание бериллиевого производства только для обеспечения ВПК нерентабельно.
- 3) Промышленность должна создать комплексный полный цикл от добычи руды до выпуска медно-бериллиевой бронзы и изделий.
- 4) Федеральные органы власти (Минпромторг России) должны реализовать программу импортозамещения бериллийсодержащей продукции в машиностроении и электротехнике. Отечественную промышленность необходимо вернуть к потреблению бериллия.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Подпрограмма «Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов» Государственной программы «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» / Постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 года № 328.
- 2) Обзор рынка бериллия в России, СНГ и мире / ООО «ИГ «Инфолайн», 2019. 64 с.
- 3) Бериллий. Технология и производство / Матясова В.Е., Москва, АО «ВНИИХТ», 2020. 320 с.
- 4) Презентация проекта «Создание производства металлического бериллия на АО «Мариинский прииск» / ГК Ростех, Москва, август 2019 г.
- 5) Способ получения металлического бериллия / Дьяченко А.Н., Крайденко Р.И., Малютин Л.Н., Петлин И.В. Патент RU 2613267, 2017.
- 6) Способ получения оксида бериллия и металлического бериллия. Дьяченко А.Н., Крайденко Р.И., Малютин Л.Н., Нечаев Ю.Ю., Петлин И.В. Патент RU 2624749, 2017.
- 7) Способ получения металлического бериллия. Дьяченко А.Н., Крайденко Р.И., Малютин Л.Н., Нечаев Ю.Ю. Патент RU 2599478. 2016.
- 8) Fluorination of beryllium concentrates with ammonium fluorides / A.A. Andreev, A.N. Dyachenko, R.I. Kraydenko // Russian Journal of Applied Chemistry. 2008. V. 81. № 2. P. 178–182.
- 9) Extraction equilibrium of beryllium and aluminium and recovery of beryllium from Egyptian beryl solution using CYANEX 921 / E.E. Zaki, Z.H. Ismail, J.A. Daoud, H.F. Aly. Hydrometallurgy. 2009. № 80. P. 221–231.
- 10) Extraction of beryllium from Indian beryl by ammonium hydrofluoride / D.D. Thorat, B.M. Tripathi, D. Sathiyamoorthy. Hydrometallurgy. 2011. № 109.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РТУТНОЙ АТМОГЕОХИМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАМЕРОВ

*Еременко Е.Г., Пушков В.С., Несмеянова А.И.
ФГБУ «ВИМС»*

Введение

Ртуть является важным элементом-индикатором при поисках широкого круга месторождений полезных ископаемых. Благодаря своим халькофильным свойствам ртуть слагает как собственно ртутные минералы (киноварь, метациннабарит, кордероит, каломель и др.), так и встречается в виде примесей в большом количестве сульфидных минералов. В силу высокого потенциала ионизации ртуть способна восстанавливаться до атомарной формы при окислении руд и мигрировать в газовой фазе [10].

Благодаря интенсивной эманации ртуть образует первичные и вторичные, в том числе атмогеохимические, ореолы на собственно ртутных и ртутно-сурьмяных месторождениях, а также на гидротермальных месторождениях нертутного состава – колчеданных, полиметаллических, медных, золото-сульфидных и т. д. [11, 12]. Повышенные содержания ртути характерны и для зон разрывных нарушений в пределах рудных полей [9].

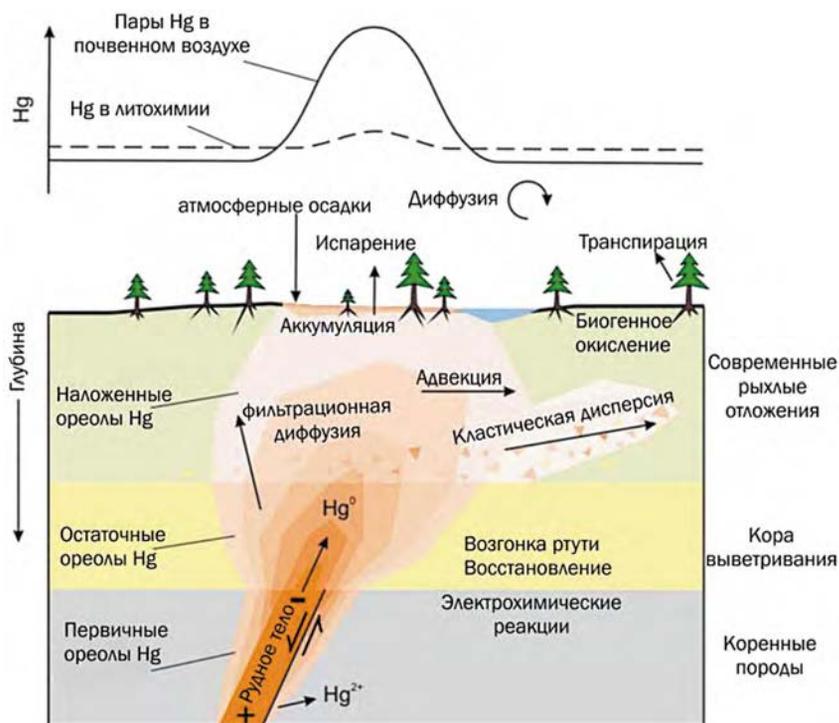


Рисунок 1. Модель, иллюстрирующая рассеяние ртути, источником которой является перекрытое полиметаллическое рудное тело [13]

Естественная дегазация ртути происходит и в настоящее время по зонам глубинных разломов при активизации этих структур в процессе кратковременного сброса тектонических напряжений во время землетрясений или при длительных динамических нагрузках на отдельные блоки земной коры [8].

Почвенно-растительный слой является природным геохимическим барьером, оказывающим влияние на накопление ртути в подпочвенном воздухе и препятствующим эманации паров в атмосферу. Данный факт позволяет проводить ртутную атмогеохимическую съемку по концентрации паров ртути на границе перехода почва – дезинтегрированная материнская порода (рис. 1) [13].

Приборная база

Ртутная атмогеохимическая съемка проводилась с использованием портативного газортутного атомно-абсорбционного анализатора модели РА-915М производства НПФ АП «Люмэкс», г. Санкт-Петербург (ООО «Люмэкс-Центрум») (рис. 2).

Данные анализаторы используются при проведении измерений массовой концентрации паров ртути в атмосферном и подпочвенном воздухе и обладают низким пределом обнаружения без предварительного концентрирования на сорбенте. Пределы определения ртути в использованном режиме составляют 5–50 000 нг/м³. В режиме высоких концентраций анализатор позволяет измерять



Рисунок 2. Газортутный анализатор РА-915М

содержание ртути до 200 000 нг/м³. Принцип работы основан на дифференциальном атомно-абсорбционном методе измерений массовых концентраций паров ртути, который реализуется с помощью зеемановской модуляционной поляризационной спектроскопии [3].

Методическая база

Существующие в настоящее время методические подходы к ртутной атмогеохимической съемке ограничиваются методическими рекомендациями, выпущенными в 1985 году [2] и методическим руководством, изданным в 2006 г. [11].

Данные рекомендации не учитывают современного состояния и потребностей отрасли, а лишь свидетельствуют о принципиальной применимости газортутных методов для решения различных поисковых задач.

Существенная часть рекомендаций посвящена методикам поиска собственно ртутных месторождений. В России в настоящий момент не ведется поисковых и добычных работ на собственно ртутное сырье. Ртуть разрабатывается попутно на медноколчеданном Талганском месторождении и как собственно металл не извлекается [6].

Разделы рекомендаций, где описывается приборная база, к настоящему моменту, существенно устарели. Современные анализаторы способны корректировать неселективное поглощение на основе эффекта Зеемана [3], что сокращает время анализа, не дает эффекта памяти, избавляет от необходимости использовать и регенерировать (отжигать) сорбент, а также позволяет получить высокую точность измерений независимо от мешающих факторов и расширить область применения газортутного метода [4].

Кроме того, имеющиеся методические рекомендации не затрагивают вопрос учёта и нивелирования метеорологических и ландшафтных особенностей района проведения съемки на результаты замеров в подпочвенной, почвенной и приземной атмосфере. Кратко отмечается лишь недопустимость атмосферных осадков, наличия многолетней мерзлоты, заболоченности и обводненности территории, скальных обнажений, неблагоприятны щебенчатые и торфянистые отложения ввиду их сильной аэрации. Определены лишь граничные диапазоны температуры воздуха (более +10°C и менее 35°C), давления (84–167 кПа) и влажности (при +25°C не более 80 %) [3].



Рисунок 3. Процесс проходки шпура



Рисунок 4. Замер содержания паров ртути в подпочвенном воздухе



Рисунок 5. Фиксация температуры почвы и атмосферных параметров

Методика проведения работ

В представленной работе приведены результаты методических работ, выполненных на двух участках в различных ландшафтно-климатических зонах: горная степь Приаргуныя и горная тайга Енисейского кряжа. На обоих участках ртутная атмогеохимическая съемка проводилась вкрест простирания основных тектонических структур в профильном варианте либо по регулярной квадратной сети. Пробоотбор выполнялся из шпура глубиной 0,3–0,5 м и диаметром 2–3 см из слоя подпочвенного воздуха. Шпур проходилась стальным ломом с использованием ручных ударных инструментов (рис. 3) непосредственно перед замером. Для герметизации шпура и минимизации попадания в пробозаборный шланг атмосферного воздуха использовались конусовидные пластмассовые манжеты (рис. 4). Забор воздуха осуществлялся 30 секунд, в течение которых фиксировались максимальное значение и средние значения каждые 10 секунд.

Для выявления влияния метеоусловий в ходе работ выполнялись замеры температуры воздуха и почвы, влажности, атмосферного давления на специально отведенном фоновом участке и на каждой точке рядового пробоотбора (рис. 5).

Также с целью контроля качества проведенных измерений выполнялось контрольное опробование подпочвенного воздуха в разные маршрутные дни.

Камеральная обработка материалов замеров подразделялась на два этапа. На первом этапе проводилась оценка вклада атмосферных показателей (влажности, давления, температуры почвы и воздуха) на наблюдаемые значения концентрации паров ртути в подпочвенном воздухе. Использовались данные как с фонового участка, так и данные замеров на каждом пункте измерений, полученные в процессе проведения рядовой съемки. На втором этапе по откорректированным данным выполнялась вариационно-статистическая обработка результатов (оценка закона распределения, расчет фоновых и аномальных содержаний), завершавшаяся составлением итоговых картографических материалов. Пример типовой методики обработки геохимических данных приведен в [5] и не будет затронут в данной публикации.

Оценка влияния атмосферных показателей на результаты анализа

С целью проверки чувствительности атмогеохимической съемки к метеоусловиям предположено, что вариации параметров метеоусловий даже внутри коридоров допуска могут вносить существенный вклад на результаты замеров и требовать ввода сложных многофакторных поправок.

А) Оценка влияния атмосферных показателей через обработку замеров на фоновом участке

С целью проверки значимости влияния метеоусловий проводился ежедневный контроль состояния фона на специально выбранном участке, характеризовавшимся отсутствием явных аномалий Hg и слоем рыхлых отложений, пригодным для исследования.

Замер осуществлялся два раза в день (утром перед началом рабочей смены и вечером по ее окончании) по методике, аналогичной для рядовых замеров.

Для оценки влияния атмосферных показателей на результаты измерений были построены 3 математические модели: линейная, множественной линейной регрессии и множественной полиномиальной регрессии.

Линейная модель и модель множественной линейной регрессии были признаны неподходящими, поскольку плохо описывали наблюдаемые признаки. Множественная полиномиальная регрессионная модель показала наилучшую репрезентативность. Значимый вклад показали значения температуры воздуха и влажности. При построении

уравнения регрессии без учета давления наиболее качественной оказывается модель с 4 степенями свободы для каждой компоненты. Уравнение кривой, описывающее зависимость концентрации ртути на фоновом участке от атмосферных параметров, имеет следующий вид:

$$C_{Hg} = 72590 - 15490 \cdot T + 1047 \cdot T^2 - 31,21 \cdot T^3 + 0,3455 \cdot T^4 + 869,2 \cdot H - 21,31 \cdot H^2 + 0,2238 \cdot H^3 - 0,0008531 \cdot H^4$$

(где T – температура воздуха, H – влажность, C_{Hg} – концентрация паров ртути).

Модель поверхности полиномиальной регрессии представлена на рис. 6.

Однако визуальное сравнение распределения паров ртути на площади работ до и после внесения поправок показало отсутствие существенной разницы в распределении фоновых и аномальных областей (с той оговоркой, что модель описывает не весь спектр вариативности атмосферных показателей, поскольку основывается на относительно немногочисленных данных утренних и вечерних замеров, без учета колебаний параметров в течение рабочей смены).

Таким образом, в изученных условиях при проведении ртутотрии замеры концентрации ртути на фоновом участке с целью нивелирования влияния погодных условий можно считать излишними и не оказывающими существенного влияния на результаты интерпретации данных.

Б) Оценка влияния атмосферных показателей, полученных в ходе проведения рядовых замеров

С целью проверки значимости влияния метеоусловий в течение рабочей смены на каждой точке замера фиксировались температура воздуха и почвы, влажность, атмосферное давление.

Для горно-степного ландшафта Приаргунского района на выборке объемом 3000 точек замеров отсутствует корреляция между содержаниями паров ртути, давлением и

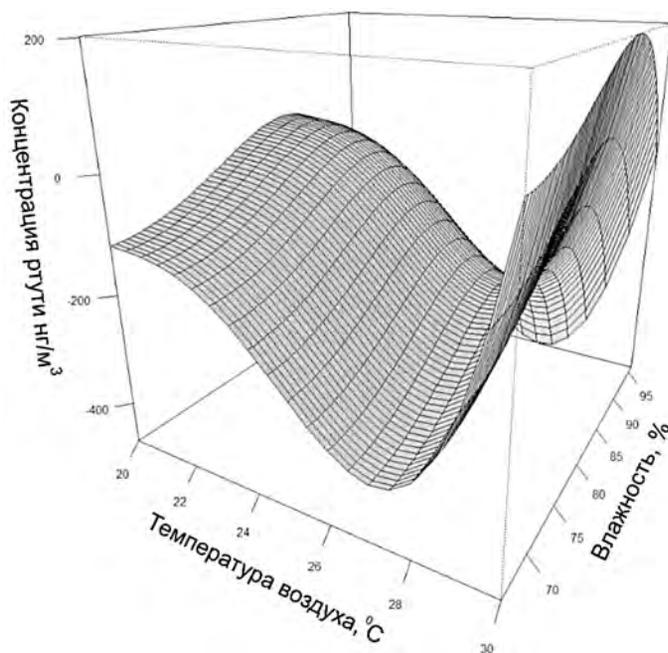


Рисунок 6. Модель множественной полиномиальной регрессии

температурой почвы (табл. 1). Слабая положительная корреляция (от $r=0,11$ до $r=0,13$) установлена только между содержанием паров Hg и влажностью. Слабая отрицательная корреляция отмечена между температурой воздуха и содержанием паров Hg. Значения коэффициента корреляции менее $r=0,2$ можно считать очень слабыми и незначимыми для итоговых результатов исследования.

Для горно-таежного ландшафта Енисейского кряжа на выборке объемом 500 точек замера отсутствует значимая корреляция между содержаниями паров ртути и температурой почвы. Слабая отрицательная корреляция выявлена между содержаниями паров ртути с атмосферным давлением и влажностью (табл. 2). Слабая положительная корреляция (от $r=0,14$ до $r=0,2$) установлена только между содержанием паров Hg и температурой воздуха.

В обоих случаях значимая отрицательная корреляция выявлена между температурой и влажностью воздуха, что объясняется уменьшением количества водяного пара в воздухе в процессе его испарения при увеличении температуры. Значимая положительная корреляция выявлена между влажностью и атмосферным давлением, а также между всеми замерами Hg.

Таблица 1

Матрица парных коэффициентов корреляции Пирсона содержаний ртути и атмосферных параметров в горно-степном ландшафте Приаргунского района

	Т возд.	Влажн.	Атм. давл.	Т почвы	h опроб.	Hg-мах	Hg-1	Hg-2	Hg-3
Т воздуха	1,00								
Влажность	-0,71	1,00							
Атм. давление	-0,21	0,45	1,00						
Т почвы	0,44	-0,24	0,02	1,00					
h опроб.	-0,04	0,04	-0,05	-0,02	1,00				
Hg-мах	-0,09	0,11	0,04	0,03	0,02	1,00			
Hg-1	-0,09	0,13	0,06	0,03	0,02	0,97	1,00		
Hg-2	-0,06	0,13	0,09	0,05	0,03	0,89	0,88	1,00	
Hg-3	-0,05	0,11	0,08	0,06	0,03	0,81	0,78	0,93	1,00

где: Т – температура, h – глубина Hg_{мах} – максимальное содержание ртути, Hg-1 – содержание ртути первые 10 сек, Hg-2 – содержание ртути 10–20 сек, Hg-3 – содержание ртути 20–30 сек. Коэффициенты корреляции значимы ($q=0,05$) для $n=3000$ при абсолютном значении (r) не менее 0,087.

Таблица 2

Матрица парных коэффициентов корреляции Пирсона содержаний ртути и атмосферных параметров в горно-таежном ландшафте Енисейского кряжа

	Т возд.	Влажн.	Атм. Давл.	Т почвы	Hg-мах	Hg-1	Hg-2	Hg-3
Т воздуха	1							
Влажн.	-0,42	1						
Атм. Давл.	0,12	0,29	1					
Т почвы	0,24	0,07	0,19	1				
Hg-мах	0,05	-0,04	-0,12	-0,05	1			
Hg-1	0,14	-0,1	-0,05	-0,02	0,92	1		
Hg-2	0,17	-0,05	-0,12	0	0,84	0,88	1	
Hg-3	0,2	-0,05	-0,1	0,02	0,77	0,83	0,94	1

где: Т – температура, h – глубина Hg_{мах} – максимальное содержание ртути, Hg-1 – содержание ртути первые 10 сек, Hg-2 – содержание ртути 10–20 сек, Hg-3 – содержание ртути 20–30 сек. Коэффициенты корреляции значимы ($q=0,05$) для $n>500$ при абсолютном значении (r) не менее 0,087.

Таким образом, метеоусловия не оказывают существенного влияния на результаты замеров, а значит, при проведении вариационно-статистической обработки не требуется ввода сложных многофакторных поправок.

Контроль качества проведенной съемки

Контрольные измерения проводились по методике пробоотбора, аналогичной для рядовых замеров, но в другой маршрутный день. Шпур контрольного опробования проходил на расстоянии 3–5 м от точки рядового опробования.

Методика анализа контрольных измерений и оценка погрешностей определения ртути проводилась в соответствии с [1]. Систематическая погрешность вычислялась по формуле

$$\Delta c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg \frac{C_{i1}}{C_{i2}},$$

где Δc – систематическая погрешность, C_{i1} и C_{i2} – содержание компонента в основном и контрольном анализах, n – число пар контрольных проб.

Систематическое расхождение рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{сист}} = 10^{\Delta c},$$

где $S_{\text{сист}}$ – систематическая ошибка, Δc – систематическая погрешность.

$S_{\text{сист}}$ показывает, во сколько раз рядовое опробование систематически отличается от контрольного и не требует исключения в пределах 0,9–1,1.

Систематическая погрешность измерений для контрольных и рядовых пар проб составила 1,07, что удовлетворяет инструктивным требованиям [1].

В большинстве случаев максимумы выявленных значений ртути при рядовом опробовании подтверждаются при проведении контрольного замера (рис. 8). Таким образом, ртутная атмогеохимическая съемка имеет приемлемую погрешность результатов.

Выводы

По результатам проведенных работ отмечены следующие положительные стороны ртутной атмогеохимической съемки:

- мобильность прибора и простота его использования в полевых условиях – для работы непосредственно с аппаратурой достаточно одного оператора и базового вводного инструктажа;
- высокая скорость производства (до 250 пунктов замера на 1 рабочую смену);
- отсутствие значимого влияния метеорологических условий на результаты наблюдений, что позволяет не вводить дополнительные поправки для последующей вариационно-статистической обработки данных;
- незначимые величины систематической и случайной погрешности измерений;
- газортутная съемка относится к оперативным методам, что позволяет непосред-

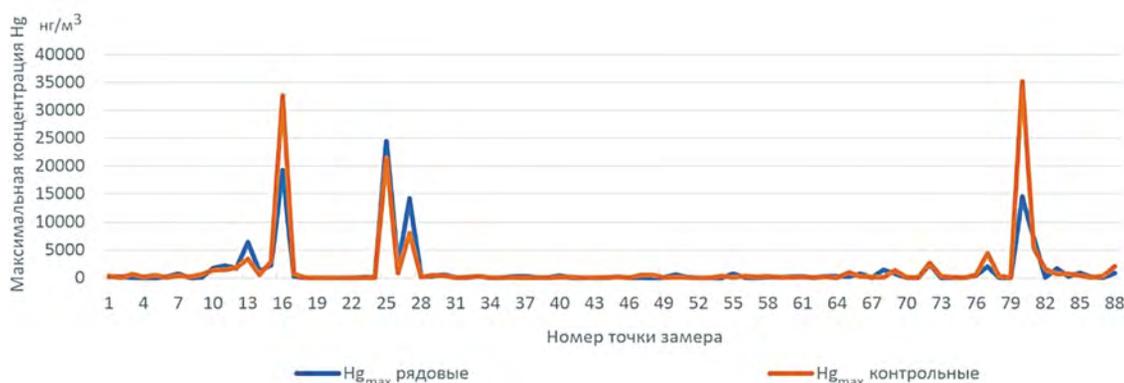


Рисунок 8. Сравнение максимальных концентраций ртути в рядовых и контрольных пробах

ственно в полевых условиях оценивать качество съемки, осуществлять интерпретацию данных и корректировать вектор проведения дальнейших работ.

К ограничениям проведения ртутной атмогеохимической съемки можно отнести:

- неприемлемость атмосферных осадков и фиксированный диапазон метеоусловий, установленный производителем оборудования (неприемлемы осадки, диапазон температуры воздуха от +10°C до +35°C, атмосферное давление от 84 до 106,7 кПа, влажность воздуха при +25°C не более 80 %);
- требования к ландшафтным условиям (отсутствие многолетней мерзлоты, заболоченности и обводненности территории, скальных обнажений, в том числе курума, нежелательны щебенистые и торфянистые отложения);
- состав маршрутной группы, который, помимо оператора, должен включать двух техников, пробивающих шпур, а также техника, ведущего документацию;
- предположено, что, несмотря на высокую точность и воспроизводимость работы самого анализатора, аттестованного для проведения количественного анализа, его полевое использование и вариативность метеорологических и ландшафтных условий делает получаемые результаты скорее полуколичественными;
- отсутствие современных методических рекомендаций по проведению такого вида работ.

Заключение

Ртутная атмогеохимическая съемка позволяет оперативно и достоверно картировать ореолы ртути в подпочвенном слое воздуха. Метод пригоден для опережающих поисковых работ на широкий круг сульфидосодержащих месторождений, поскольку Hg входит в кристаллическую решетку многих сульфидных минералов (в первую очередь сфалерита, пирита, антимонита, галенита, блеклых руд) и высвобождается в процессе их окисления [7], а также для регионального картирования тектонических нарушений и зон дезинтеграции пород, по которым пары ртути мигрируют к поверхности вследствие ее диссоциации из горных пород с кларковыми концентрациями Hg.

Атмогеохимическая газортутная съемка может быть также рекомендована для постановки на площадях, где предполагается наличие скрытого или слабоэродированного гидротермального оруденения, для которого часто характерны повышенные концентрации ртути на верхних уровнях эрозионного среза.

Эффективность атмогеохимической газортутной съемки может быть повышена путем ее комплексирования с другими опережающими поисковыми методами, в частности, с геофизическими или геохимическими исследованиями, что позволяет надежнее отбраковывать зоны рассеянной минерализации и выявлять потенциально рудоносные структуры путем комплексирования результатов, полученных разными методами.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений // Григорян С.В., Кузин М.Ф., Соловов А.П. под ред. Овчинников Л.Н. // Недра, Москва, 1983, 191 с.
- 2) Методические рекомендации по газортутному методу поисков рудных месторождений // В.А. Бабкин, В.П. Радзин, В.З. Фурсов. // М.: ИМГРЭ, 1985., 128 с.
- 3) Монитор ртути RA915 AM. Руководство по эксплуатации, 28 с.
- 4) Неволько П.А., Фоминых П.А. Опыт-методическая газортутная съемка на Новолушниковском золоторудном месторождении (Салаирский кряж). // Разведка и охрана недр. М., 2017. С. 17–20.
- 5) Несмеянова А.И., Еременко Е.Г. Алгоритм обработки данных геохимического опробования при поисках месторождений твердых полезных ископаемых // Тезисы докладов конфе-

- ренции: Современная техника и технологии в научных исследованиях: Бишкек; ИС РАН; 2023. С. 118–125.
- 6) Обзор рынка ртути и ее соединений в России и СНГ (2 издание) // М.; 2022 80 с. // электронное издание // <https://www.infomine.ru/research/4/522>; дата посещения: 26.02.2024.
 - 7) Озерова Н.А. Ртуть и эндогенное рудообразование // М.: Наука, 1986, 232 с.
 - 8) Рихванов Л.П., Ляпина Е.Е., Юсупов Д.В. и др. Эманации ртути Байкальского рифта по данным изучения годовых колец деревьев (на примере Тункинской впадины) // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле, 2021, том 496, № 1. С. 30–35.
 - 9) Фурсов В.З. Ртуть – индикатор при геохимических поисках рудных месторождений // М., «Недра», 1977, 144 с.
 - 10) Фурсов В.З. Возможности ртутметрии // М.: ИМГРЭ, 1998, 188 с.
 - 11) Фурсов В.З. Ртутметрические методы при геологическом картировании и экологических исследованиях (Методическое руководство) // М.: «ГЕОКАРТ, ГЕОС», 2006, 315 с.
 - 12) Фурсов В.З. Ртутметрические методы поисков свинцово-цинковых месторождений // М.: ФГУП «ИМГРЭ», 2014, 150 с.
 - 13) Rukholov A.S., Mashyanov N. R., Pitirimov P. V., Hickin A.S., Golovetsky M.: Coats B. Gaseous elemental mercury (GEM) response from sediment-covered, volcanogenic massive sulphide mineralization on southern Vancouver Island // Geological Fieldwork 2021, British Columbia Ministry of Energy, Mines and Low Carbon Innovation, British Columbia Geological Survey Paper 2022–01, pp. 123–135.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ОРГАНИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ

*Зарганаев А.З. – 1,3, Галиева Ж.Н. – 1, Дронов Д.В. – 1, Ухорская В.О. – 1,
Быданов Б.А. – 2, Шабалтас Ю.А. – 2
1 – ООО «ЛИТ», г. Королев, 2 – ООО «Скайград-инновации», г. Королев,
3 – ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва*

Введение

В последние годы редкоземельные элементы (РЗЭ) стали играть решающую роль в современной жизни, и повседневная деятельность людей в значительной степени зависит от них. Россия имеет долю в 16,6 % по запасам РЗЭ, т. е. третье место в мире после Китая и Бразилии, но уровень добычи составляет лишь 1 % по состоянию на 2020 год. По объемам добычи Россию опережают Китай, Австралия, США, Мадагаскар и Индия. Добыча РЗЭ в 2010 году в мире составила 97,0 тыс. т и с каждым годом происходило существенное её увеличение. В 2020 году получено 267,7 тыс. т, что 2,75 раза больше, чем десять лет назад. В России объемы получения РЗЭ достаточно стабильны и имеют пределы от 1,5 до 3,5 тыс. т в год [1]. Высокие темпы роста добычи РЗЭ говорят о растущем спросе на данные элементы (табл. 1, 2, рисунок).

Постепенно РЗЭ вытесняют из производства катализаторов ранее широко использовавшиеся элементы, такие, как титан, кобальт и никель. Это происходит благодаря улучшенным целевым показателям конечной продукции при использовании РЗЭ в производственном процессе. Несмотря на химическое сходство, многочисленные практические применения РЗЭ часто зависят от их необычных физических свойств,

Таблица 1

Структура потребления РЗЭ по направлениям использования в пересчете на оксиды в мире в 2012, 2016 гг.*

Продукция	2012		2016		2020	
	тыс. т	%	тыс. т	%	тыс. т	%
Постоянные магниты	24	20	49	31	56	28
Катализаторы крекинга и автокатализаторы	24	20	29	18	40	20
Сплавы для металлургии и никель–металлгидридные батареи	23	19	29	18	36	18
Полирующие порошки	15	12	21	13	26	13
Стекло и керамика	18	15	17	11	24	12
Люминофоры	8	7	6	4	8	4
Прочие	8	7	8	5	10	5
Всего	121	100	159	100	200	100

* По данным BRGM (French Geological Survey, Orléans, France), 2021 и Pitt Street Research, 2021.

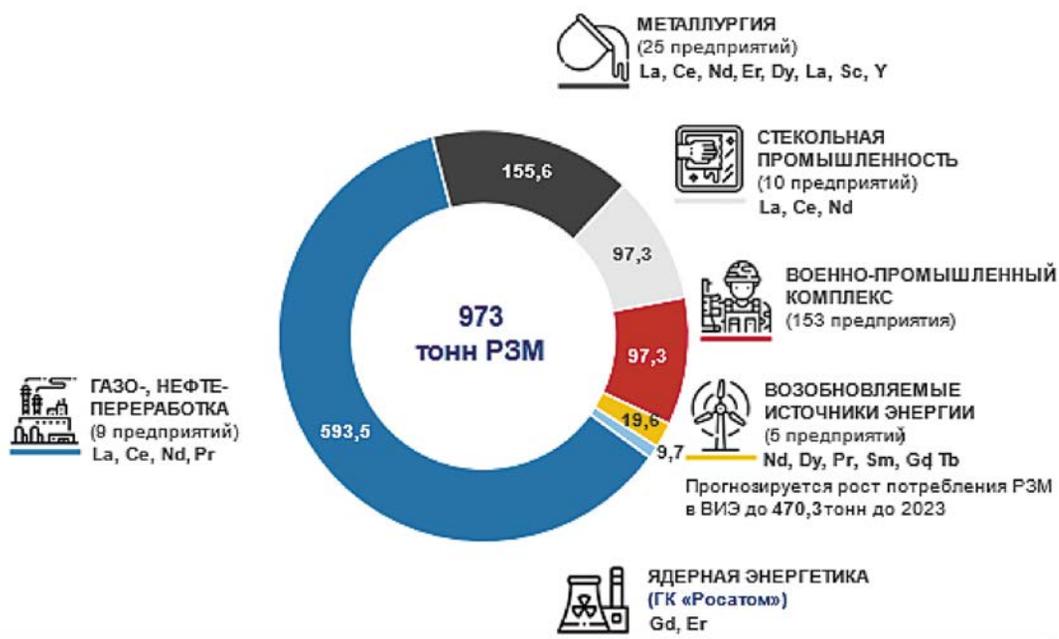


Рисунок. Структура потребления РЗМ в России

которые характерны для конкретных элементов, поэтому необходимо решение проблемы их разделения. Кроме того, понимание уникальных свойств РЗЭ привело к их более широкому использованию в современном обществе.

Компания ООО «ЛИТ» – единственное в России предприятие, которое использует технологии глубокого передела концентрата РЗЭ с получением индивидуальных элементов и производит продукцию на их основе, в частности, катализаторы для различных

Таблица 2

Прогноз среднегодового темпа спроса по основным направлениям использования РЗЭ*

Продукция	%
Постоянные магниты	5,9
Катализаторы крекинга и автокатализаторы	4,3
Сплавы для металлургии и никель–металлгидридные батареи	3,9
Полирующие порошки	2,3
Стекло и керамика	4,5
Люминофоры	0,1
Прочие	7,2

* По данным App Securities, 2022.

промышленных процессов. Всё исходное сырье для разделения РЗЭ и последующего синтеза продукции ООО «ЛИТ» закупает у отечественных производителей.

Применение в нефтехимии

Уникальные каталитические свойства РЗЭ делают их важнейшим ресурсом для промышленного применения, такого, как переработка нефти, производство синтетического каучука, каталитическое сжигание ископаемого топлива, контроль выбросов автомобильных двигателей и очистка промышленных отходов, воздуха от твердых частиц. В частности, лантан и церий используются в нефтепереработке для производства бензина, что представляет собой одно из крупнейших конечных применений РЗЭ. Катализаторы, обогащенные РЗЭ, необходимы для крекинга (расщепления) молекул тяжелых углеводородов на более мелкие молекулы, что позволяет нефтеперерабатывающим заводам получать значительно больше продукта на баррель переработанной нефти [3]. Эти РЗЭ в конечном счете делают процесс жидкостного каталитического крекинга более эффективным, что увеличивает выход бензина на единицу катализатора [4].

Спросом у нефтеперерабатывающих заводов пользуется азотнокислый раствор лантана, который применяется для получения цеолитсодержащих катализаторов крекинга нефти. На площадке ООО «ЛИТ» успешно реализуется производство азотнокислого раствора лантана, который поставляется на Омский НПЗ «Газпром нефть». Объем поставок составляет до 50 тонн/год в пересчете на оксид лантана.

Азотнокислый раствор лантана выпускается в виде трех марок: А, Б, В по ТУ 20.13.65-001-92697718-2018. Основное отличие марок в содержании массовой доли лантана по оксиду от 65 до 90 % (табл. 3).

Таблица 3

Показатели качества азотнокислого раствора лантана, выпускаемого компанией ООО «ЛИТ»

Наименование показателя	Характеристика и норма		
	Марка А	Марка Б	Марка В
Значение показателя рН	1,5–3,0	1,0–3,0	1,5–2,5
Массовая концентрация РЗЭ (в пересчете на оксиды), г/дм ³ , не менее	180,0	180,0	180,0
Массовая доля оксида лантана, %, не менее	90,0	70,0	65,0
Массовая доля оксида церия, %, не более	–	≤ 25	≥ 8
Массовая доля суммы оксидов празеодима и неодима, %, не более	1,0	5,0	12
Массовая доля нитрата аммония к сумме оксидов РЗЭ, %, не более	20	20	65

Применение в органическом синтезе

Другой широкой областью применения РЗЭ является производство органических соединений на их основе. Такие соединения широко используются во многих отраслях промышленности. Например, металлы неодим и гадолиний используются для синтеза органических соединений, которые применяются в каталитических системах для полимеризации синтетических каучуков [5].

Наиболее изучены такие соединения, как 2-этилгексаноат неодима, октаноат неодима, нафтенат неодима, триоксобутилнеодим, бис-2-этилгексилфосфат неодима и неodeканоат неодима [6]. Неодеканоат неодима (торговое название версатат неодима) широко используется заводами по производству синтетического каучука, поскольку в полимере достигается высокое содержание 1,4-цис-звеньев и отсутствие в процессе ароматических растворителей.

Сотрудниками ООО «ЛИТ» разработан и внедрен в производство новый способ синтеза неодаканоата неодима [7, 8], выгодно отличающийся от известных высокой скоростью синтеза, проведением синтеза при комнатной температуре и простотой технологического оборудования, при этом сохраняющей высокие требования качества выпускаемой продукции. Она включена в реестр отечественной продукции предприятий Минпромторга. Производительность установки составляет 250 т/год. Поставки осуществляют на два крупнейших российских завода по производству синтетического каучука – ПАО «Нижнекамскнефтехим» и АО «Воронежсинтезкаучук».

Неодаканоат неодима выпускается в виде трех марок А, Б, В по ТУ 20.14.33-011-92697718-2021. Марки отличаются по содержанию неодима в продукте и использованному растворителю (табл. 4).

Таблица 4

Показатели качества неодаканоата неодима, выпускаемого компанией ООО «ЛИТ»

Наименование показателя		Характеристика и норма		
Марка продукции	Ед. изм.	А	Б	В
Растворитель	–	Гексан	Нефрас П1 63/75	Нефрас П1 63/75
Массовая доля неодима	%	8,5 – 9,5	8,5 – 9,5	9,5 – 10,5
Массовая доля неодаканоата неодима	%	38,8 – 43,3	38,8 – 43,3	43,3 – 47,8
Влага, не более	ppm	250	500	10000
Содержание свободной кислоты, не более	%	2,5	2,5	2,5

Также в настоящее время проводятся научные исследования по синтезу и применению неодаканоата неодима в качестве компонента каталитической системы для полимеризации синтетического каучука. Празеодим наряду с неодимом, церием и гадолинием проявляет высокую каталитическую активность при получении синтетического каучука. По результатам испытаний, проведенным во ВНИИСК им. С.В. Лебедева на опытном образце неодаканоата неодима, обнаружено, что неодаканоат неодима незначительно уступает неодаканоату неодима по каталитическим свойствам.

Помимо неодаканоата неодима, ООО «ЛИТ» выпускает хлорид неодима в качестве катализатора процесса получения синтетического каучука, поскольку не все заводы перешли на процесс с использованием неодаканоата неодима. Поставка хлорида неодима производится в АО «Стерлитамакский нефтехимический завод».

Хлорид неодима выпускается в виде марки Б по ТУ 20.13.65-015-92697718-2023 (табл. 5).

Таблица 5

Показатели качества хлорида неодима, выпускаемого компанией ООО «ЛИТ»

Наименование показателя	Марка Б
Массовая доля неодима, %, не менее	54,0
Массовая доля неодима в пересчете на сумму P_2O_3 ($Nd_2O_3/TREO$), %, не менее	99,9
Массовая доля хлора, %, не менее	38,0
Массовая доля воды, %, не более	5,5
Массовая доля оксихлоридов неодима, %, не более	5,0
Массовая доля железа (Fe_2O_3), %, не более	0,1
pH 1% водного раствора	5,4 – 7,0

В качестве промотора железооксидных и железокалиевых катализаторов для дегидрирования олефиновых углеводородов используется оксид церия (IV). Он увеличивает удельную поверхность катализатора, тем самым увеличивая конверсию метилбутенов, а также повышает селективность образования изопрена [9].

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Мингалеева Р.Д. Запасы и добыча редкоземельных металлов и элементов – ключевой фактор развития возобновляемой энергетики на современном этапе трансформации мировой экономики // Вестник университета. 2023. №. 5. С. 37-45.
- 2) Jha, A.R. (2014). Rare Earth Materials: Properties and Applications (1st ed.). CRC Press.
- 3) Balaram V. Sources and applications of rare earth elements //Environmental Technologies to Treat Rare Earth Elements Pollution: Principles and Engineering; IWA Publishing: London, UK. 2022. С. 75-113.
- 4) Sadeghbeigi R. Fluid catalytic cracking handbook: An expert guide to the practical operation, design, and optimization of FCC units. – Butterworth-Heinemann, 2020.
- 5) Полимеризация изопрена в присутствии каталитических систем на основе соединений гадолиния / Е.И. Левковская, С.В. Бубнова, В.С. Бодрова [и др.] // Каучук и резина. 2014. № 1. С. 12–15. EDN SAXIYV.
- 6) Friebe L., Nuyken O., Obrecht W. A Comparison of Neodymium Versatate, Neodymium Neopentanolate and Neodymium Bis (2-ethylhexyl) phosphate in Ternary Ziegler Type Catalyst Systems with Regard to their Impact on the Polymerization of 1, 3-Butadiene //Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry. 2005. Т. 42. №. 7. С. 839-851.
- 7) Патент № 2785807 С1 Российская Федерация, МПК C07C 51/41, C08F 4/52, C01F 17/17, C01F 17/20. Способ получения неодеканоата неодима : 2022106877 : заявл. 16.03.2022 : опубл. 13.12.2022 / Ж.Н. Галиева, А.М. Абрамов, Ю.Б. Соболев, А.В. Солодовников, А.В. Галанцев, А.З. Зарганаев.
- 8) Абрамов А.М., Галиева Ж.Н., Солодовников А.В., Алдушкин А.В., Зарганаев А.З. Разработка технологии получения солей карбоновых кислот РЗМ (на примере неодеканоата неодима) для использования в качестве катализатора синтеза синтетического каучука. // IV Международный симпозиум «Фундаментальные вопросы геологии, добычи, разделения редких, редкоземельных, благородных металлов и создания современных материалов на их основе» (REE-2021).
- 9) Юлдашева Е.М., Ахмедьянова Р.А., Насыров И.Ш., Касьянова Л.З. «Производство изопрена дегидрированием метилбутенов в присутствии железо-церий оксидных катализаторов» // Тезисы докладов XXVIII научно-практической конференции «Резиновая промышленность. Сырьё, материалы, технологии». М., 2023. С. 37-40.

ОФИОЛИТОВЫЕ АССОЦИАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ МЕТАЛЛОВ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В УЗБЕКИСТАНЕ

Исоков М.У. – 1, Мовланов Ж.Ж. – 2, Марипова С.Т. – 3, Рахматуллаев Ф.Ф.о. – 3
 1 – Университет геологических наук (УГН), г. Ташкент, Республика Узбекистан,
 2 – Центр геотехнологических технологий УГН, г. Ташкент, Республика Узбекистан,
 3 – Государственное учреждение «Институт минеральных ресурсов» (ГУ «ИМР»),
 г.Ташкент, Республика Узбекистан

Введение. Значение минерально-сырьевых ресурсов как никогда обострилось в последнее десятилетие в связи с наступившей новой научно-технической революцией с ее прорывными технологиями, такими, как нейронные сети, зеленая бескарбоновая энергетика, создание материалов с совершенно уникальными свойствами и др.

Происходящие преобразования производственных сил и производственных отношений колоссальны, и их масштабы можно будет оценить в будущем.

Новые прорывные технологии связаны с военным делом и нашей повседневной жизнью: космическое оборудование различного назначения, устройства связи и передачи информации, электробатареи, аккумуляторы большой емкости и др.

Для всего этого необходимо минеральное сырье. В странах с высоким технологическим потенциалом появилось такое понятие, как «critic minerals», обозначающее «минеральное сырье для высоких технологий» и аналогичное по смыслу понятию «стратегическое и дефицитное сырье».

В настоящее время в перечень критического минерального сырья Евросоюза (Critical Raw Materials Act) входят бор, висмут, кобальт, медь, галлий, германий, литий, магний, марганец, природный графит, никель, металлы платиновой группы, редкоземельные металлы, используемые в магнитах (неодим, празеодим, тербий, диспрозий, гадолиний, самарий, церий), а также кремний, титан, вольфрам, сурьма, бокситы, бериллий, полевошпат, плавленый шпат, гафний, гелий, ниобий, фосфоритная руда, фосфор, коксующийся уголь, скандий, стронций, тантал и ванадий [11].

Список критически важных для США сырьевых ресурсов состоит из 50 видов минерального сырья: бериллий, палладий, германий, литий, магний, никель, марганец, вольфрам, хром и др. [4].

В Индии в список критически важных для развития индустрии «чистой энергии» входят литий, кобальт, никель, титан, графит, олово, ванадий и медь [9].

Правительство России утвердило обновленный перечень основных видов стратегического минерального сырья в 2023 году. В перечень вошли: нефть, природный газ, гелий, уран, марганец, хром, титан, бокситы, медь, свинец, сурьма, олово, цинк, никель, молибден, вольфрам, кобальт, редкие (литий, рубидий, цезий, бериллий, скандий и др.) и редкоземельные металлы (иттрий, лантан, церий, празеодим, неодим, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций), золото, серебро, платиноиды (рутений, родий, палладий, осмий, иридий, платина), алмазы, графит, фосфаты, соли калийные, шпат плавленый, особо чистое кварцевое сырье и подземные воды [10].

В мире идет интенсивный поиск новых источников сырья. Узбекистан известен всему миру как золото-редкометаллическая, урановая провинция с уникальными и крупными месторождениями, в которую в течение нескольких десятилетий направлялась большая часть геологоразведочных и научно-исследовательских работ. В последние 10 лет

уделяется большое внимание укреплению и диверсификации сырьевых источников цветных, драгоценных, черных, редких, редкоземельных, радиоактивных металлов.

Известно, что в офиолитовых комплексах концентрируются многие виды полезных ископаемых (ПИ), в том числе металлы высоких технологий: при выветривании офиолитов в условиях тропического климата образуются коры выветривания, обогащенные никелем и кобальтом; изменения ультраосновных частей офиолитовых комплексов благоприятны для возникновения месторождений нерудного сырья – змеевика, брусита, магнезита и др.; к апикальным частям разрезов офиолитов часто приурочены колчеданные месторождения, связанные с деятельностью гидротермальных систем. К гарцбургит-дунитовым формациям в офиолитах приурочены залежи хромитов, часто с высокими содержаниями платины.

В разновозрастных офиолитах России, Казахстана сконцентрированы крупные месторождения хромитов с платиноидами, никеля, кобальта, меди, золота и других рудных и нерудных полезных ископаемых [8].

Известные месторождения хромитов Турции Гулеман, Копдаг, Кызылдаг связаны с неотетскими офиолитами, обнаженными вдоль сутурных (шовных) зон Измир-Анкара-Эрзинджан и Загрос-Битлис [13].

Эти и многие другие примеры концентрирования месторождений металлов высоких технологий актуализируют изучение офиолитовых комплексов Узбекистана для укрепления минерально-сырьевой базы страны.

В настоящее время офиолитовые комплексы в республике изучены недостаточно, хотя имеются исследования, указывающие, что они содержат золото, медь, металлы платиновой группы (МПГ), редкоземельные элементы (РЗЭ).

Так, в горах Султанувайс в офиолитовом комплексе обнаружено пока что единственное титано-магнетитовое месторождение Тебинбулак [12]. Из нерудных месторождений можно отметить месторождение листовенита Зинельбулак в горах Султанувайс, которое связано с гидротермально измененными метаморфизованными породами офиолитовой формации – метасоматически измененными амфиболитами или с серпентинитовыми тальк-карбонатными породами.

Одним из наиболее изученным и перспективным типом оруденения, сформировавшимся в тесной связи с базальтами толеитового типа, превращенными в глаукофановые сланцы (кумбулакская свита), является цинково-медно-колчеданное с золотом месторождение Карамурун Северного Букантау [3]. Альпинотипные гипербазиты (букантауский плагиогранит – габбро-перидотитовый комплекс) сопровождаются небольшими проявлениями хромитов.

Методы. Датировка абсолютного возраста, определение химического и минералогического состава пород, слагающих офиолитовые ассоциации фрагментов океанической коры Узбекистана, важны для понимания начальной динамики Туркестанского океана (предшественника Палеотетиса) и помогут понять эволюцию и влияние мантии на образование полезных ископаемых, перспективы минерально-сырьевого потенциала. Создание базы графических материалов офиолитовых ассоциаций Узбекистана, анализ их выражения в материалах ДЗЗ использовались для установления критериев поиска месторождений, связанных офиолитовыми комплексами, и выявления позиций прогнозно-перспективных площадей.

Результаты, обсуждение. Современный ороген Тянь-Шаня сформировался в конце палеогена и неогене в связи с коллизией Индостанского континента с окраиной Евразии после закрытия океана Тетис. Этот пояс на территории Узбекистана можно разделить на три ветви (Срединный, Южный и Юго-Западный Тянь-Шань) (рис. 1).

Ультрабазит-базиты Южного Тянь-Шаня по имеющимся признакам соответствуют продуктам офиолитовой ассоциации.

Изучение ультрабазит-базитового магматизма и связи с ним оруденения в Узбекистане осуществлялось силами нескольких поколений геологов-ученых (Я.С. Висьневский, И.Х. Хамрабаев, Т.Н. Далимов, В.В. Баранов, К.М. Кромская, Е.М. Головин, А.А. Кустарникова, Г.Г. Лихойдов, А.А. Мусаев, Ш.А. Муминов, И.К. Абубакиров, Ю.Г. Корчевская, А.В. Головки, Ф.К. Диваев, А.М. Мусаев, Р. Ахунджанов, У.Д. Маморозиков, С.О. Зенкова, Ф.Б. Каримова и др.).

Возраст офиолитовых комплексов Узбекистана спорный, но всегда растянут во времени. По [6] возраст офиолитового террейна растянут от кембрия до раннего девона.

Источник магмы для базит-ультрабазитов – мантийный. Эволюционирующий процесс базит-ультрабазитового магматизма, от гарцбургитового (серпентинитового) в верхнем слое до пикритового в более глубинных частях, отражается в последовательности вулканических и плутонических формаций [7].

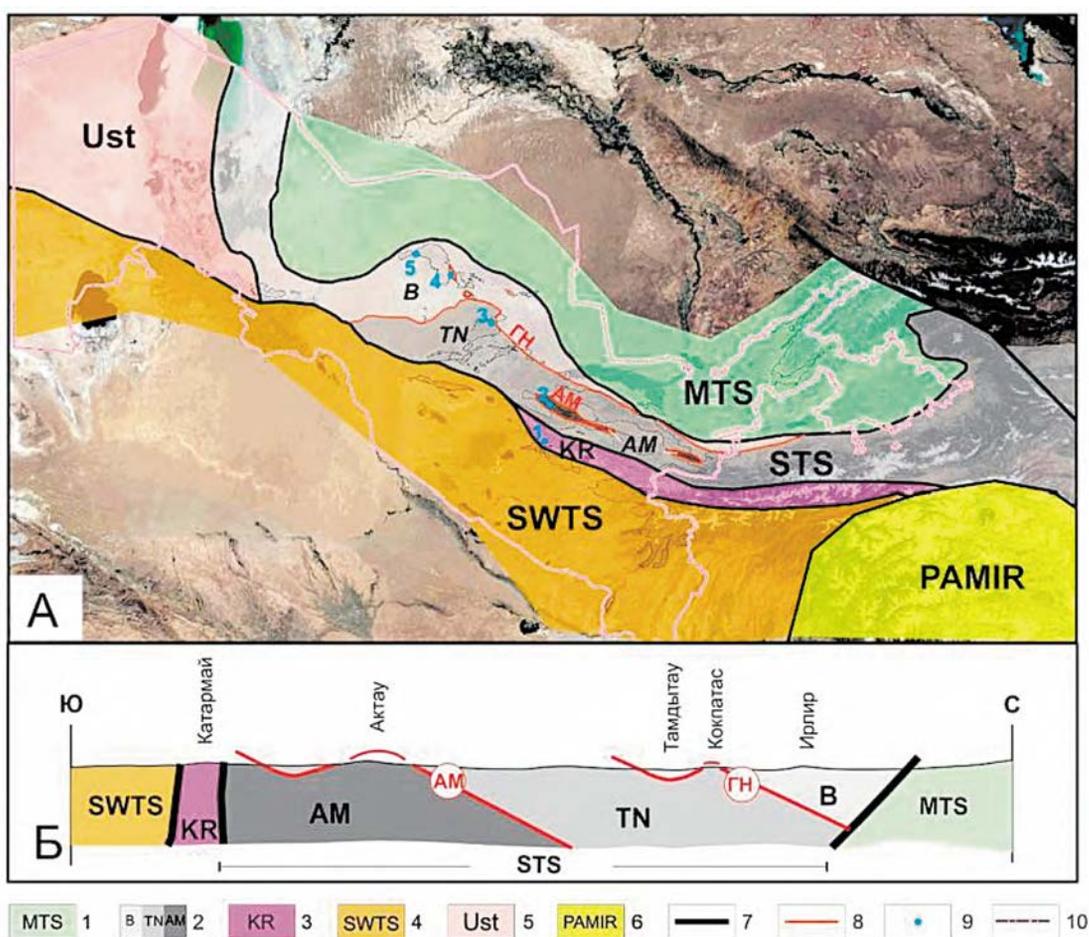


Рисунок 1. Складчато-надвиговые пояса западной части Тянь-Шаньского орогена (Ж.Ж. Мовланов с использованием материалов Р.Х. Миркамалова и др., 2020)

А – на космоснимке; Б – принципиальный разрез.

Условные обозначения: 1 – Срединный Тянь-Шань; 2 – Южный Тянь-Шань – МТС (В – Букантауский, TN – Тамдытау-Нуратинский, AM – Актау-Мальгузарский блоки); 3 – Катармай-Рабинджанская сутура KR; 4 – Юго-Западный Тянь-Шань – SWTS; 5 – Устюртский микроконтинент – Ust; 6 – Памирская система; 7 – разломы, разделяющие геодинамические комплексы; 8 – надвиги, разделяющие блоки Южного Тянь-Шаня (GH – главный надвиг, AM – Актау-Мальгузарский надвиг); 9 – участки узлового строения, показанные на принципиальном разрезе: 1 – Катармай, 2 – Актау, 3 – Тамдытау, 4 – Кокпатас, 5 – Ирлир; 10 – государственная граница Узбекистана

В Южном Тянь-Шане ультрабазит-базитовые ассоциации сформированы в различных геодинамических обстановках. В зонах рассеянного спрединга по разломам шло внедрение недифференцированного мантийного расплава, обогащенного хромом и соответствующего по составу гарцбургитам. Эти образования интенсивно серпентинизированы. После длительного периода (D_1 - C_1) карбонатонакопления из глубинных частей верхней мантии поднимаются пикритовые расплавы, в результате дифференциации которых формируются магмы основного состава [2]. Они потенциально рудоносны на железо, титан, медь, платиноиды, золото и графит [1]. В горах Кульджуктау формируется Бельтауский интрузив, в Султанувайсе – Тебинбулакский массив, в Южном Нуратау и Мальгузаре – дайки габбро-диабазов.

Сутурные швы, которые трассируют офиолиты, хорошо выражены на материалах дистанционного зондирования Земли (МДЗЗ) благодаря тому, что сутуры обычно разграничивают блоки, отличающиеся по структурному рисунку и формационному составу слагающих их пород. На МДЗЗ высоких уровней генерализации сутурные швы

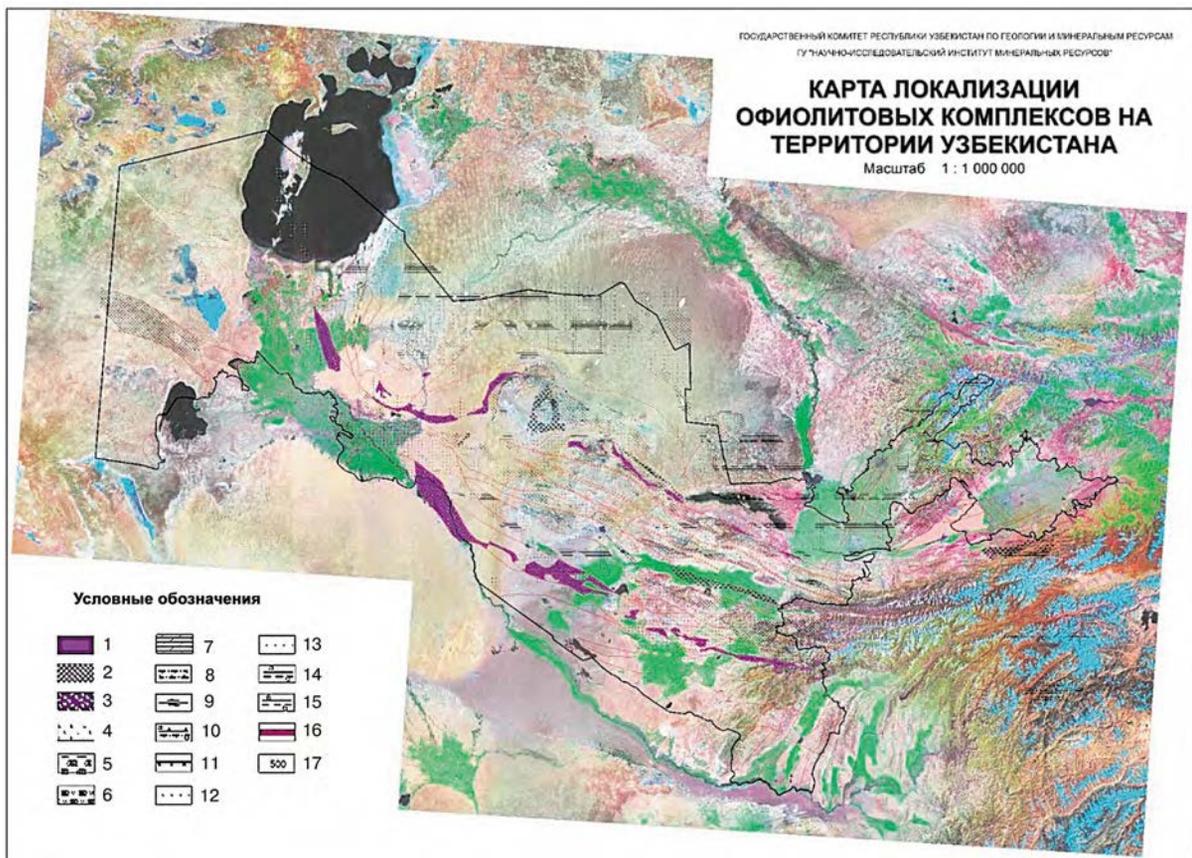


Рисунок 2. Цифровая космокарта локализации офиолитовых комплексов Узбекистана
 Комплексы палеоокеанической коры: 1 – ультрамафические (альпинотипные) протрузивные массивы; 2 – офиолитовые (с сохранившейся последовательностью слоев); 3 – офиолитовые меланжи; 4 – кремнисто-базальтовые первого и второго слоев палеоокеанической коры; 5 – обломочные и кремнистые глубоководных прогибов; 6 – обломочные и кремнистые осадочного чехла; 7 – базальтово-карбонатные чехлов внутриокеанических поднятий и поднятий в задуговых бассейнах (симаунтов). Разрывные нарушения: 8 – тектонические ограничения флексурных и сдвиговых зон; 9 – сдвиги левые; 10 – надвиги: установленные (а), предполагаемые (б); 11 – взбросы; 12 – границы тектонических покровов; 13 – границы офиолитовых покровов; 14 – разломы неопределенной кинематики главные: установленные (а), предполагаемые (б); 15 – разломы неопределенной кинематики второстепенные: установленные (а), предполагаемые (б); 16 – государственная граница; 17 – изопахиты платформенного чехла

проявлены в виде четких узких полос, отличающихся по ориентированному расположению внутренних элементов. Высокая насыщенность сутурных швов магматическими проявлениями предопределяет большую роль этих структур в локализации различного, в первую очередь эндогенного, оруденения.

На рис. 2 представлена карта расположения офиолитовых комплексов на территории Узбекистана.

В Узбекистане наиболее изученными и перспективными площадями на обнаружение месторождений металлов высоких технологий, связанных с офиолитовыми комплексами, являются: базит-ультрабазиты западной части гор Северный Тамдытау, гипербазит-габбро-плаггиогранитовый комплекс гор Султанувайс, Бельтауский габбро-перидотитовый массив, офиолитовые ассоциации зоны Северо-Нуратинского разлома. Рассмотрим некоторые из них.

С офиолитовым комплексом западной части Северного Тамдытау (серпентиниты, пироксениты, перидотиты и др. ультрабазитового, а также габбро-базитового ряда) в Тескудук-Ченгельдинском, Учкудук-Тюменбайском, Ажриктинском и других массивах широко развиты бедная хромитовая и платиноидная минерализации.

По данным (Мусаев, 1967; Хамрабаев и др., 1969) на площади выявлены хромитовые рудопроявления, которые по своим запасам, качеству руд, степени обогатимости вполне могут соответствовать требованиям металлургической промышленности.

Большинство ультрабазит-базитовых массивов офиолитов традиционно относятся либо к хромитоносным, либо к платиноносным. Первые, как правило, сложены магнезиальными, а вторые – железистыми ультрабазитами. В то же время в последние годы появилось много свидетельств того, что в пределах единых массивов возможно совмещение различных формационных типов гипербазитов с присущими для них хромитовой и платиноидной минерализацией [1, 5, 7].

Подтверждена специализация перидотитов, пироксенитов и серпентинитов Тескудук-Ченгельдинского гипербазит-базитового массива на хром, никель и кобальт.

По данным [5] содержания хрома в перидотитах и серпентинизированных разностях достигает до 450 г/т, никеля 1800 г/т, кобальта 140 г/т.; в габброидах и парагенетически ассоциирующих с ними базитовых дайках содержания этих элементов околочларковые. Содержания золота, серебра и сопутствующих им элементов (Se, Sb, Te, As, Bi) постепенно увеличиваются от перидотитов к габброидам и их дериватам.

Аналогичные данные получены по результатам масс-спектрометрии (ICP-MS) 38 проб, отобранных на данном массиве в рамках международного узбекско-турецкого гранта «Сопоставительный анализ офиолитовых комплексов Узбекистана и Турции для установления глубинных процессов в мантии и связанного рудообразования» (2020–2022 г.).

В лаборатории института геологии и геофизики имени Х.М. Абдуллаева активационным методом в сульфидных монофракциях (пирротин) Тескудук-Ченгельдинского массива (6 проб) установлено до 2 г/т платины, 1,5 г/т палладия и в значительных количествах рутений (1,25 г/т), осмий (до 1,17 г/т) и иридий. Среднее содержание платиноидов в сумме составляет 4,32 г/т. Кроме того, в гравиконцентрах сульфидоносных пород того же массива методом активации установлено более 1 г/т рутения и 0,5 г/т осмия, а также повышенное содержание золота – 9,30 г/т.

Таким образом, хром-никелевое оруденение, совмещенное с платиноидно-и золото-серебряным, является результатом эволюции рудно-магматической системы Тескудук-Ченгельдинского ультрабазит-базитового массива, сформированной в геодинамической обстановке спрединга.

Рекомендуется проведение научно-тематических и общих поисков на двух перспективных площадях, входящих в его состав: Тескудук-Ченгельдинская и Учкудук-Тюменбайская площади. Тескудук-Ченгельдинская площадь сложена перидотитами, пироксенитами, габбро и серпентинитами. Учкудук-Тюменбайская полоса офиолитов расположена южнее и прослеживается на расстоянии более 10 км. В ее составе преобладают серпентиниты с реликтами перидотитов (верлитов). Они размещаются среди рифейских, кембрийских и ордовикских образований, представленных амфиболитами, хлорит-серицит-кварцевыми сланцами, гнейсами, песчаниками и алевролитами (рис. 3).

Еще одной перспективной территорией Узбекистана на обнаружение металлов высоких технологий является Султанувайсский гипербазит-габбро-плагиогранитовый комплекс ($D_{2-3(?)S}$), представленный слабоэродированными линейными и изометричными выходами серпентинизированных ультраосновных пород и амфиболитизированных габбро (рис. 4). Центральная полоса ультрабазитовых образований гор Султанувайс протягивается через весь хребет с северо-запада на юго-восток почти на 50 км при средней

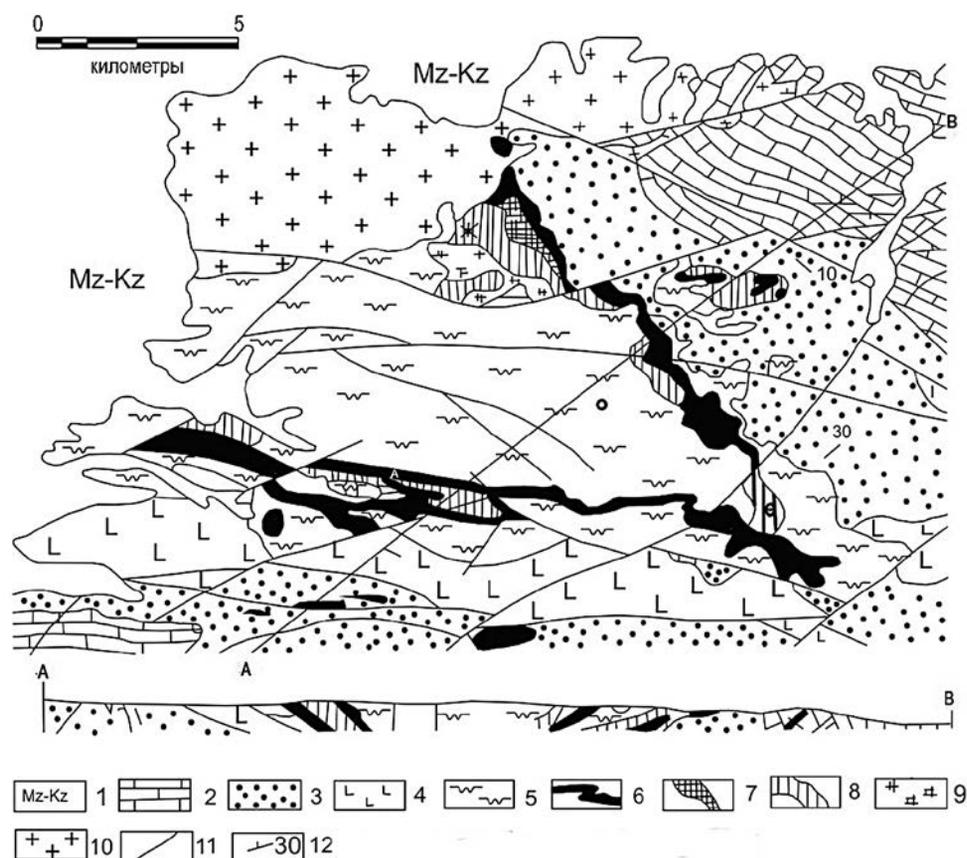


Рисунок 3. Схематическая карта базит-ультрабазитовых проявлений Северного Тамдытау
Условные обозначения: отложения 1 – мезозой-кайнозойские (Mz-Kz); 2 – карбонатные (D-C): известняки, доломиты, мраморы; 3 – терригенные (O-S): песчаники, алевролиты, конгломераты, аргиллиты, сланцы с прослоями известняков, доломитов и кремней; 4 – вулканогенно-осадочные (S_2): плагиоклазовые порфириды, туфопесчаники, алевролиты, альбитофиры, актинолитовые сланцы, базальтовые порфириды; 5 – амфиболовые хлорит-серицит-кварцевые сланцы, гнейсы, амфиболиты с прослоями и горизонтами черных кремней, доломитов, песчаников и алевролитов; 6 – серпентиниты и пироксениты с вкрапленностью и гнездами платиноносного хромита; 7 – серпентинитизированные перидотиты и дуниты с аксессуарными (0,4–1,5 %) и рудными хромитами; 8 – габбро и габбро-амфиболиты с платиноносными сульфидными сегрегациями; 9 – плагиограниты; 10 – мелко- и крупнозернистые граниты; 11 – разломы; 12 – элементы залегания пород

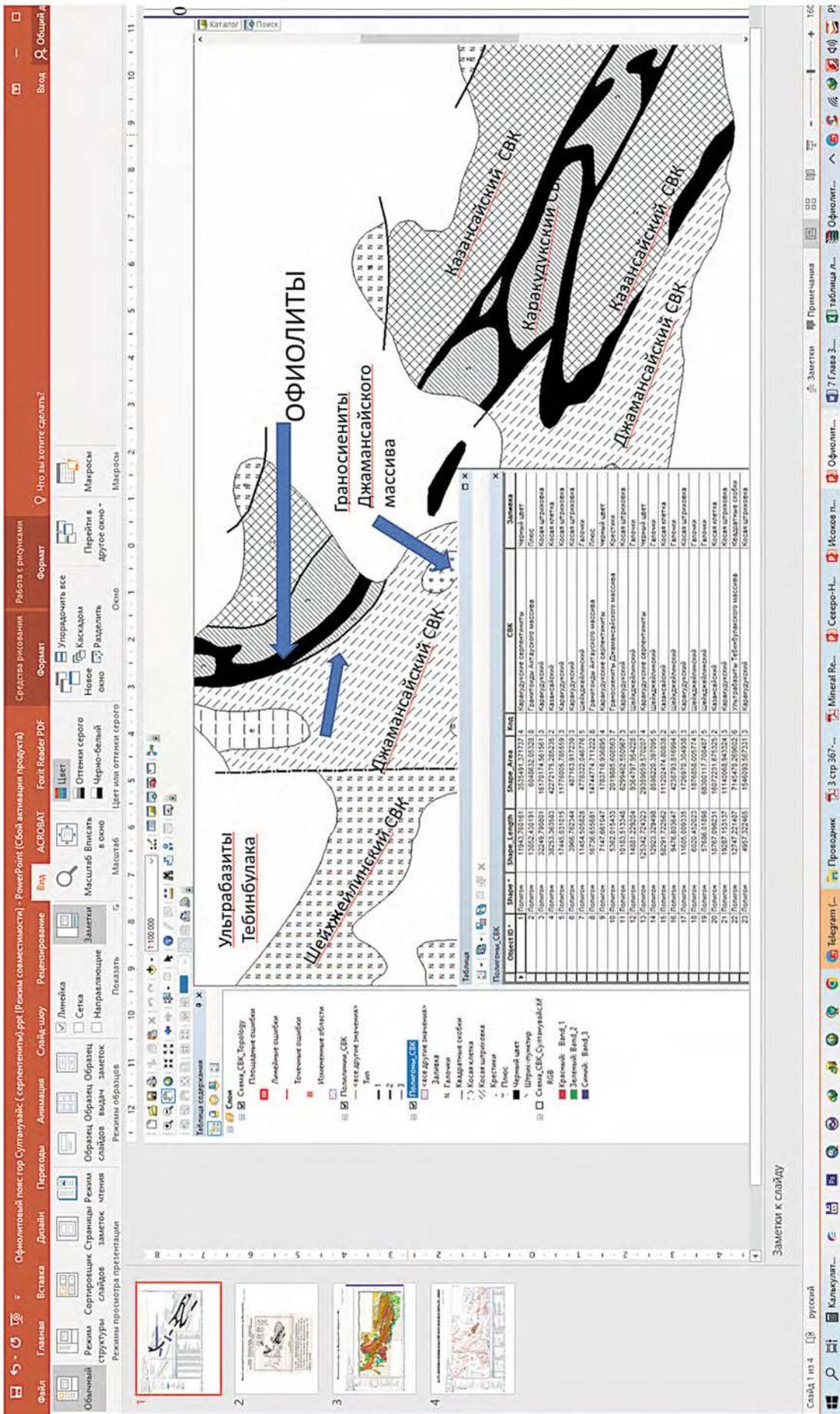


Рисунок 4. Расположение офиолитовых комплексов гор Султанувайс

ширине 2–2,5 км. В строении полосы принимают участие серпентиниты и продукты их изменения (листвениты, талькиты, пироксениты, родингиты, тальк-карбонатные, актинолитовые, тремолитовые породы, габбро и габбро-амфиболиты, а также плагиограниты, развитые лишь в ее восточной части. Возраст цирконов из плагиогранитов, определенный U-Pb методом – 505 млн лет (поздний кембрий). Серпентиниты образуют линзообразные, обычно межпластовые тела длиной от 1 до 12 км, шириной от 0,2 до 0,6 км. Габброиды северной части характеризуются повышенными содержаниями хрома, никеля и железа. На юге высокожелезистые и высокотитанистые гранат-антофиллитовые апопироксенитовые амфиболиты близки по составу образованиям Тебинбулакского комплекса. Содержания сфена в южных амфиболитах – 15–17 %, диоксида титана – до 2,99 %, трёхоксида железа – до 43,57 %, окиси железа – до 23,85 %. Магнетит и титаномагнетит образуют лапчатые и скелетные зёрна размером до 0,2 мм, вытянутые в направлении сланцеватости. Установлены столбообразные сегрегации хромитовых тел в виде гнёзд и шлиров в перидотитах и пироксенитах. Содержания Cr_2O_3 – 16,5–30,3 %; сопутствующих: платины – до 0,03 г/т, палладия – до 0,1 г/т, вольфрама – десятые и сотые доли процента, золота – 0,1–0,3 г/т.

Перспективная Каракудукская офиолитовая полоса (см. рис. 4) имеет неглубокий эрозионный срез; по особенностям поля силы тяжести можно предположить приуроченность основных хромитовых скоплений к трубообразному подводющему каналу и расширение трубообразных апофиз на глубину с увеличением параметров хромитовых тел. По данным геологической съемки масштаба 1:50 000 жилы сплошных и вкрапленных хромитовых руд прослеживаются на глубину до десятков и сотен метров, при этом платиноносные сегрегации хромита приурочены к глубоко эродированной центральной части интрузий. На Каракудукском проявлении хрома в серпентинизированных пироксенитах в интервалах 0–3 м, 14–16 м, 18–36 м, 48–57 м, 79–80 м установлены его содержания 0,1–0,3 % (скв. 35, Артиков, 2003) с сопутствующим никелем.

Восточно-Кахралысайское проявление хрома расположено в пределах Султанбобо-Янтаклинской площади. Густо вкрапленные и сплошные зернистые скопления хромшпинелидов размером от первых сантиметров до 3,5x0,8 м залегают среди брекчированных серпентинитов. Количество хромшпинелидов варьирует от 3–5 % в мелких скоплениях до 12–15 % в крупных. Содержания Cr_2O_3 – 16,5–30,3 %. Вмещающие апоэффузивные амфиболиты каракудукской толщи на контакте с серпентинитами содержат вкрапленность и гнездообразные скопления пирротина, халькопирита, пентландита. Перспективы на никель неясны.

Бельтауский габбро-перидотитовый массив расположен в юго-западной части Центрально-Кызылкумского рудно-магматического концентратора, западной оконечности хребта Кульджуктау (рис. 5).

Всё это дало основание подтвердить вывод относительно формирования пород Бельтауского габбро-перидотитового массива в условиях островодужного мантийного магматизма, эволюция которого сформировала графитовое и медно-никелевое оруденение – месторождение Тасказган [5] и определила высокие перспективы перекрытых флангов массива.

Заключение

1. В пределах Узбекистана ультрабазит-базитовый магматизм, с которым ассоциируют офиолиты, зафиксирован в венде-кембрии, ордовике-силуре, раннем-среднем карбоне и перми.

2. Анализ материалов по геологии, абсолютному возрасту, петрографии, петрохимии, изотопной геохимии и распределению РЗЭ показывает, что ультрабазит-базитовый

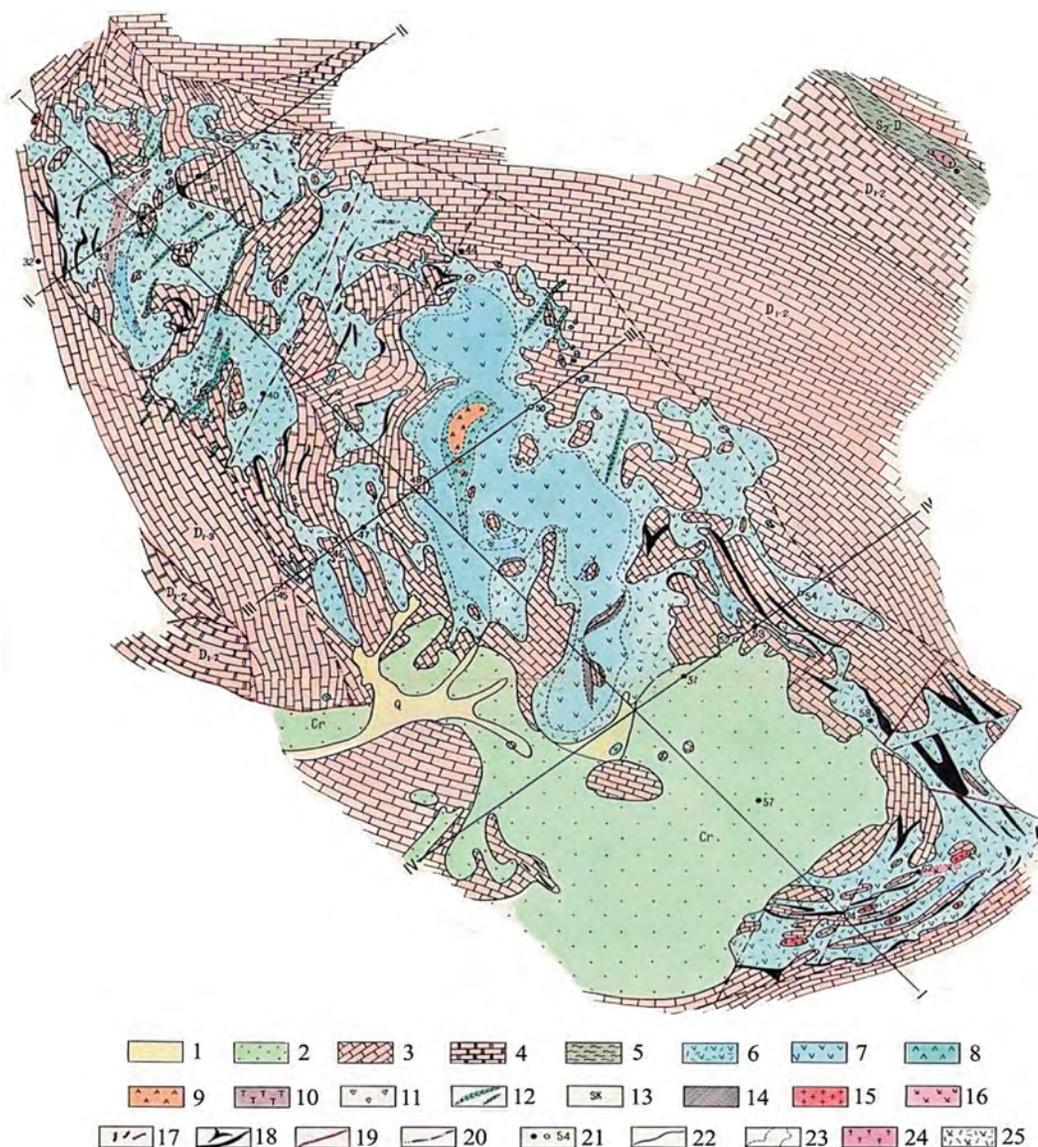


Рисунок 5. Схематическая геологическая карта Бельтауского габброидного массива. (Оцифрована по материалам В.В. Баранова и др.)

Условные обозначения: отложения 1 – Q; 2 – терригенно-осадочные; 3 – известняки D_{1-2} ; 4 – доломиты и доломитизированные известняки D_{1-2} ; 5 – метаморфизованные песчано-сланцевые отложения S_2-D ; 6 – роговообманковое габбро; 7 – габбро с титан-авгитом; 8 – лейкократовые габбро; 9 – анортозит и полосчатое габбро; 10 – лерцолит и плагиолерцолит; 11 – пегматоидное габбро; 12 – микрогаббро и кварцевое микрогаббро; 13 – карбонатитовый альнеит; 14 – пироксен-гранат-воластонитовый скарн; 15 – гранитоиды; 16 – габбро-сиенит; 17 – кварцевые жилы; 18 – тела графита; тектонические нарушения: 19 – прослеженные, 20 – предполагаемые; 21 – места проходки скважин; 22 – интрузивные контакты; 23 – постепенные взаимопереходы габброидов; 24 – диорит и кварцевый диорит; 25 – габбро-норит и амфиболизированный габбро-норит

магматизм характеризуется разнообразием петрографических типов пород и потенциальной рудоносностью их на Fe, Ti, Cr, V, Ni, Co, Cu, Au, Ag и платиноиды.

3. Исходные ультрабазитовые образования имеют мантийный источник.

4. Мантийный магматизм Южного Тянь-Шаня (Западный Узбекистан) относится к палеовулканической офиолитовой ассоциации и представлен двумя формациями.

5. Создана электронная карта локализации офиолитовых комплексов Узбекистана с использованием цифровых космоснимков.

6. Исследования показывают на возможность и перспективы обнаружения месторождений хромитов, металлов платиновой группы (МПГ), комплексных с золотом металлов в офиолитовых ассоциациях Узбекистана.

7. Выделены перспективные площади в горах Тамдытау, Султанувайс, Букантау, Кульджуктау для проведения ГРП и подготовки предложений для инвестирования.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Ахунджанов Р., Мамарозиқов У.Д., Зенкова С.О., Ф.Б. Каримова. Рудоносность ультрабазит-базитовых ассоциаций разных геодинамических обстановок (Срединный и Южный Тянь-Шань). Материалы Всероссийской конф. «Современные проблемы магматизма и метаморфизма», Санкт-Петербург, 2012. С. 53–56.
- 2) Далимов Т.Н., Ганиев И.Н. Эволюция и типы магматизма Западного Тянь-Шаня. Ташкент: Университет, 2010. 226 с.
- 3) Исоков М.У., Марипова С.Т., Мовланов Ж.Ж., Петров С.Ю. Предпосылки обнаружения промышленного медного оруденения в Северном Букантау // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы геологии, инновационные методы прогнозирования, добычи и технологии обогащения полезных ископаемых». Ташкент, 2022. С. 383–386.
- 4) Кондратьев В.Б. Роль критически важных сырьевых материалов в экономике США // Горная Промышленность № 5, 2022, с. 131–134. Источник: <https://mining-media.ru/ru/article/new-tech/17611-rol-kriticheski-vazhnykh-syrevykh-materialov-v-ekonomike-sha>.
- 5) Мамарозиқов У.Д. Петрология и минералого-геохимическая оценка перспектив рудоносности ультрабазитов и базитов Тескудук-Ченгельдинского массива (Тамдытау, Западный Тянь-Шань) // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2020, № 1. С. 161–183.
- 6) Миркамалов Р.Х., Чирикин В.В., Хан Р.С., Харин В.Г., Сергеев С.А. Результаты U-Pb (shrimp) датирования гранитоидных и метаморфических комплексов Тянь-Шаньского складчатого пояса (Узбекистан) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1. Санкт-Петербург, 2012. Вып. 1. С. 3–24.
- 7) Нуртаев Б.С., Каримова Ф.Б., Зенкова С.О. Потенциальная рудоносность интрузивов различных геодинамических обстановок (Республика Узбекистан) // Материалы XIII Всероссийского петрографического совещания (с участием зарубежных ученых) «Петрология и геодинамика геологических процессов». Иркутск, 2021. С. 44–48.
- 8) Полянин В.С. Офиолиты Урало-Азиатского подвижного пояса: закономерности структурно-вещественной и минерагенической эволюции, модели формирования минеральных месторождений // Научно-технический журнал «Георесурсы». № 2 (19) 2006. С. 31–36.
- 9) Петров А. Индия перечисляет 30 важнейших полезных ископаемых для развития чистой энергетики // Электронный ресурс: <https://ensat.ru/news/technology/288.htm>. 03.07.2023.
- 10) Распоряжение Правительства РФ от 30.08.2022 № 2473-р «Об утверждении Перечня основных видов стратегического минерального сырья».
- 11) European Commission. Critical Raw Materials Act: securing the new gas & oil at the heart of our economy | Blog of Commissioner Thierry Breton (September 14, 2022) // URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/STATEMENT_22_5523.
- 12) M.U. Isokov, J.J. Movlanov, S.T. Maripova. Mineral Ophiolite Fossils Complexes Of South Tyan-Shan // Palarch's Journal Of Archaeology Of Egypt/Egyptology 17(9), P. 10309–10316. 2020. ISSN 1567–214x.
- 13) Cahit Dönmez, Zehra Deveci Aral, Nail Yıldırım, Kurtuluş Günay, Samet Saka, Esra Yıldırım, Osman Parlak, Yahya Çiftçi, Semiha Öncü. Turkish ophiolites and related ore deposits // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы геологии, инновационные методы прогнозирования добычи и технологии обогащения полезных ископаемых». Ташкент, 2022. С. 411–413.

ПЕРЕРАБОТКА СПОДУМЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТА КОЛМОЗЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ПОЛУЧЕНИЕМ КАРБОНАТА ЛИТИЯ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ СИНТЕЗА ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

*Касиков А.Г., Щелокова Е.А., Куншина Г.Б., Бочарова И.В., Кузнецов И.А.
ИХТРЭМС КНЦ РАН, г. Анапты*

Литий широко используется в производстве литий-ионных аккумуляторов, керамике, стекле, медицине, производстве первичного алюминия и полимеров. Ожидается, что спрос на литий как на стратегический металл достигнет 2,68 млн т к 2030 году [1]. Мировые запасы лития сосредоточены в основном в рассолах соляных озер и пегматитовых минералах. Сподумен и лепидолит – основные руды, из которых в настоящее время извлекается литий. Однако лепидолит обычно содержит большое количество фтора, что приводит при его переработке к коррозии оборудования и нанесению вреда окружающей среде [2]. В результате сподумен, не содержащий фтор, стал наиболее оптимальным ресурсом для развития литиевой промышленности. Сподуменовый рудник в Гринбуше, Западная Австралия, является крупнейшим действующим литиевым рудником в мире. Руда, добываемая на этом предприятии, имеет самую высокую доступную концентрацию оксида лития. Второй по величине источник сподумена находится в Пилбаре, Западная Австралия. В Кингс-Маунтин, Северная Каролина, находится третье по величине месторождение. Значительные ресурсы пегматита находятся также в Китае, России, Бразилии, Индии, Мозамбике, Заире, Республике Конго и Зимбабве. Собственно литиевые месторождения в России расположены в Мурманской и Иркутской областях. Доля лития Колмозерского месторождения в Мурманской области в общероссийских запасах составляет 23,8 % [3].

Как правило, концентрация лития в исходных рудах характеризуется низким содержанием целевого компонента (до 3,7 % в сподумене), поэтому для получения чистых соединений лития необходимы этапы предварительного обогащения руды (измельчение, магнитная сепарация, флотация). Дальнейшая переработка сподуменовых концентратов проводится по щелочной, хлорной, сульфатной или сернокислотной технологиям.

После более чем 50 лет развития сернокислотный метод – наиболее широко используемый промышленный процесс извлечения лития из сподумена, преимуществами которого являются высокое извлечение лития (~90 %) [4, 5], пригодность для низкосортных руд и высокое содержание лития в растворе выщелачивания (до 5 г/л) [6].

Литий используется в основном в виде карбоната, гидроксида или хлорида. Требования к качеству литиевого сырья формируются в соответствии с его назначением. Около 60 % мировой потребности в товарных формах лития и его соединений удовлетворяется более дешевыми техническими сортами литиевых продуктов, а объемы потребления высокочистого сырья сравнительно невелики. Сырье повышенной чистоты используется, как правило, для производства батарей, коммуникационного оборудования и видеоаппаратуры, а также в качестве химических реагентов.

В России в настоящее время чистые соединения лития получают из технических солей и концентратов зарубежного производства. Ранее мы разработали способ синтеза твердого электролита состава $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) со структурой NASICON с



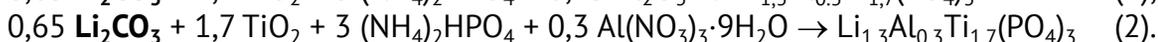
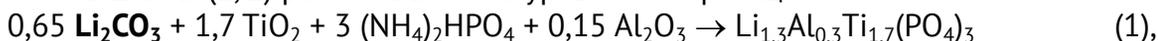
высокой Li-ионной проводимостью с использованием стандартных реактивов марок «хч» и «осч» [7]. Цели настоящей работы – получение чистого карбоната лития из сподуменового концентрата Колмозерского месторождения и его использование в качестве прекурсора для синтеза твердого электролита со структурой NASICON состава $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{M}^{\text{IV}}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$, где (M^{IV} – Ti или Ge), которые считаются одними из наиболее перспективных материалов, используемых в качестве электролита и компонента композитных электродов в полностью твердотельных литий-ионных аккумуляторах (ЛИА).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сподумен, использованный в данном исследовании, был получен методом ручной разборки руды, отобранной в районе Колмозерского месторождения в районе г. Бол. Потчеварак (Мурманская обл.). Химический анализ исходного сподуменового концентрата, мас. %: 2,61 Li, 0,7 Fe, 13,4 Al, 0,53 Ca, 24,5 Si. Термическую обработку и сульфатизирующий обжиг сподуменового концентрата проводили в муфельной печи (Nabertherm LHT 02/17, Германия) при 950 и 250 °C соответственно.

В качестве исходных веществ для синтеза LATP использовали Li_2CO_3 (полученный из сподуменового концентрата Колмозерского месторождения методом сульфатизации), $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ «х.ч.», $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ «ос.ч.» или $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ «х.ч.». В качестве титансодержащего компонента использовали TiO_2 анатазной модификации, который получали разложением двуводного титанилсульфата $\text{TiO}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ «ч.» при 700 °C в течение 4 ч. Применение TiO_2 анатазной формы обеспечивает кристаллизацию LATP при более низкой температуре, чем при использовании TiO_2 в форме рутила [8]. Теоретическое содержание элементов в твердом электролите (LATP (в пересчете на оксиды)) составляет, мас. %: Li_2O – 5,06, Al_2O_3 – 3,99, TiO_2 – 35,42, P_2O_5 – 55,52.

Состав шихты (1, 2) рассчитывали по уравнениям реакций:



Синтез заключался в высокотемпературном спекании смеси исходных веществ. Стехиометрическую смесь исходных компонентов помещали в муфельную печь МИМП-3П с программным управлением и нагревали со скоростью 10 °C/мин до 290 °C с изотермической выдержкой в течение 1 ч. При этой температуре происходило вспенивание реакционной смеси с удалением газообразных продуктов (NH_3 , H_2O , CO_2). Далее реакционную массу измельчали и прессовали в таблетки, которые отжигали при 800 °C в течение 2 ч. После отжига таблетки вновь измельчали, из полученного порошка прессовали таблетки, которые спекали в муфельной печи при 1000 °C в течение 2 ч для последующего измерения электрохимических характеристик.

Фазовый состав порошков твердого электролита LATP определяли с использованием дифрактометра XRD-6000 Shimadzu (CuK_α -излучение, графитовый монохроматор). Для расшифровки дифрактограмм применяли международную базу данных ICDD PDF-4. Термические исследования проводили на синхронном термическом анализаторе HQT-4 в интервале 30-1000 °C в атмосфере воздуха со скоростью нагрева 20 °C/мин. Методом импедансной спектроскопии изучали ионную проводимость LATP в диапазоне частот $10\text{-}2 \cdot 10^6$ Гц с амплитудой переменного сигнала до 0,1 В импедансметром Z-2000 (Elins). Измерения были выполнены в экранированной ячейке зажимной конструкции на таблетках LATP диаметром 10–12 мм и толщиной 1–2 мм с нанесенными графитовыми электродами. Метод импедансной спектроскопии заключается в измерении частотных зависимостей действительной (Z') и мнимой (Z'')

компонент комплексного импеданса. Наглядным представлением экспериментальных данных служит зависимость $Z'' = f(Z')$, называемая спектром, или годографом импеданса. Удельную ионную проводимость LATP определяли экстраполяцией годографа импеданса $Z'' = f(Z')$ на ось активных сопротивлений и рассчитывали с учетом геометрических размеров таблетки по формуле:

$$\sigma = \frac{4h}{R\pi d^2} \quad (3),$$

где h – толщина таблетки, d – диаметр таблетки, R – сопротивление таблетки.

Электронную проводимость определяли методом потенциостатической хроноамперометрии с использованием потенциостата P-8 (Elins). Постоянное напряжение 1,0 В от потенциостата прикладывали к симметричной ячейке С/LATP/С с блокирующими графитовыми электродами. Значение электронной проводимости рассчитывали по формуле:

$$\sigma_e = \frac{I_{ст}h}{US} \quad (4),$$

где $I_{ст}$ – ток стабилизации, U – приложенное постоянное напряжение, h – толщина таблетки, S – площадь поперечного сечения таблетки.

Число переноса иона Li^+ рассчитывали по формуле:

$$t_i = \frac{\sigma_t - \sigma_e}{\sigma_t} \quad (5),$$

где σ_t – общая проводимость, σ_e – электронная проводимость, См/см.

Окно электрохимической стабильности LATP определяли методом вольтамперометрии с линейной разверткой потенциала в ячейке С/LATP/Li с рабочим электродом из углерода и противоз электродом из металлического лития в диапазоне 0,1–8,0 В при скорости сканирования 2 мВ/с потенциостатом P-8 (Elins).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее нами был изучен технологический процесс сернокислотного выщелачивания сподуменового концентрата Колмозерского месторождения и определены параметры процесса, обеспечивающие максимальную степень извлечения лития (~98 %) [9]. Установлено, что при температуре 950–1000 °С в течение 30 минут происходит трансформация а-сподумена в b-форму, сернокислотный обжиг необходимо осуществлять при 140 % избытке серной кислоты при температуре 250 °С в течение 30 минут, водное выщелачивание спека - при температуре 90 °С при Т:Ж = 1:3–5 в течение 15–20 минут. В результате были получены растворы сульфата лития, содержащие до

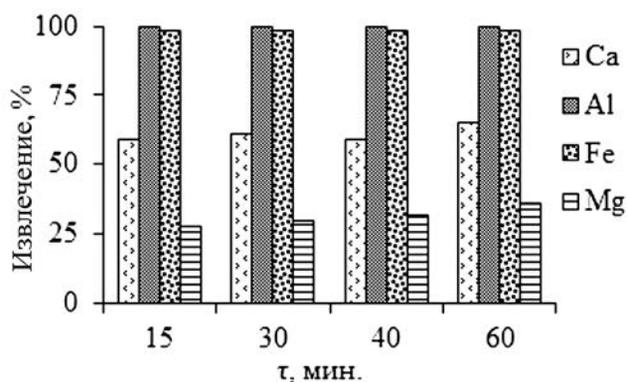


Рисунок 1. Осаждение Al, Fe, Ca и Mg из раствора водного выщелачивания спека

5 г/л Li. Основными примесями в растворах являются, г/л: 1,8 Al, 0,8 Fe, 0,27 Ca и 0,025 Mg. В настоящей работе изучалась возможность очистки растворов сульфата лития от примесей. Осаждение Fe и Al из раствора водного выщелачивания спека производилось путем нейтрализации раствором карбоната лития до достижения pH среды 5. После нагрева до 50 ± 1 °С растворы выдерживали в течение 1 часа. На рис. 1 представлены результаты влияния продолжительности процесса

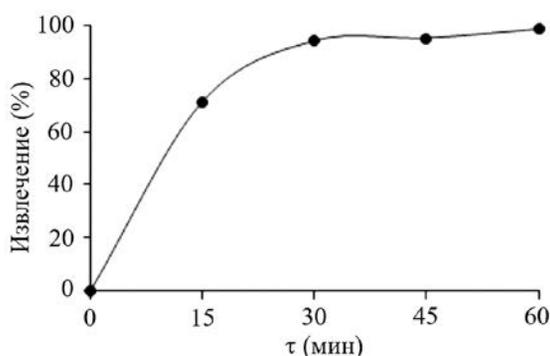


Рисунок 2. Влияние продолжительности процесса на степень извлечения Ca при осаждении 0,1 N раствором $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$

Таблица 1

Влияние температуры и продолжительности процесса карбонизации на степень извлечения лития из раствора сульфата лития

t, мин	15	30	45	60
E (Li), %	66,2	67,5	68,8	70,3
t, °C	25	45	65	95
E (Li), %	60,0	67,1	69,1	70,3

70,2 до 84,6 %. Фильтрат, содержащий Na_2SO_4 , охлаждали до 0 °C для кристаллизации $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$. Термообработка маточного раствора после отделения сульфата натрия при 95 °C позволяет повысить сквозное извлечения лития до 94,6 %. Для удаления примесей полученный Li_2CO_3 (табл. 2, Li_2CO_3 б/очистки) промывали дважды горячим насыщенным раствором Li_2CO_3 . В табл. 2 представлен состав полученных образцов карбоната лития. На рис. 3 представлены рентгенограммы полученных образцов Li_2CO_3 . Образец Li_2CO_3 характеризуется более высокой степенью кристалличности после дополнительной отмывки от примесей.

Полученные образцы карбоната лития были использованы для синтеза твердого электролита состава $\text{Li}_{1,3}\text{Al}_{0,3}\text{Ti}_{1,7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) со структурой NASICON. Сложные фосфаты со структурой NASICON состава $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{M}^{\text{IV}}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$, где (M^{IV} – Ti или Ge) считаются одними из наиболее перспективных неорганических твердых электролитов. Высокая проводимость по иону Li^+ , термическая и химическая устойчивость, стабильность на воздухе перспективны для использования их в качестве электролита и компонента композитных электродов в полностью твердотельных литий-ионных аккумуляторах (ЛИА). Использование твердого электролита может не только существенно повысить

Таблица 2

Химический состав образцов Li_2CO_3

Наименование	Li_2CO_3 , мас. %	Содержание примесей, ppm									
		Fe	K	Al	Cu	Mn	Si	Ca	Mg	Na	SO_4^{2-}
Li_2CO_3 (б/очистки)	99,0	50	9	1,5	6	8	60	200	8	99	630
Li_2CO_3 (очищ.)	99,6	6	–	–	5	5	–	18	–	–	200

выдержки раствора на степень очистки раствора от примесей. Для более глубокой очистки раствора от ионов Mg раствор доводили до pH=12 раствором гидроксида натрия. После подкисления раствора до pH=3 кальций из раствора удаляли с использованием оксалата натрия при температуре 95 °C (продолжительность 1 ч) (рис. 2). Степень извлечения магния и кальция составила 99,9 и 99,8 % соответственно.

В табл. 1 представлены результаты изучения влияния температуры и продолжительности процесса на степень извлечения лития из очищенного раствора сульфата лития.

После очистки и концентрирования раствор подвергался карбонизации раствором Na_2CO_3 для синтеза Li_2CO_3 при температуре 90 ± 1 °C в течение 1 ч. Следует отметить, что на степень извлечения лития влияет изменение порядка смешения растворов карбоната натрия и сульфата лития. Так, капельное введение раствора сульфата лития в раствор карбоната натрия позволяет повысить степень извлечения лития с

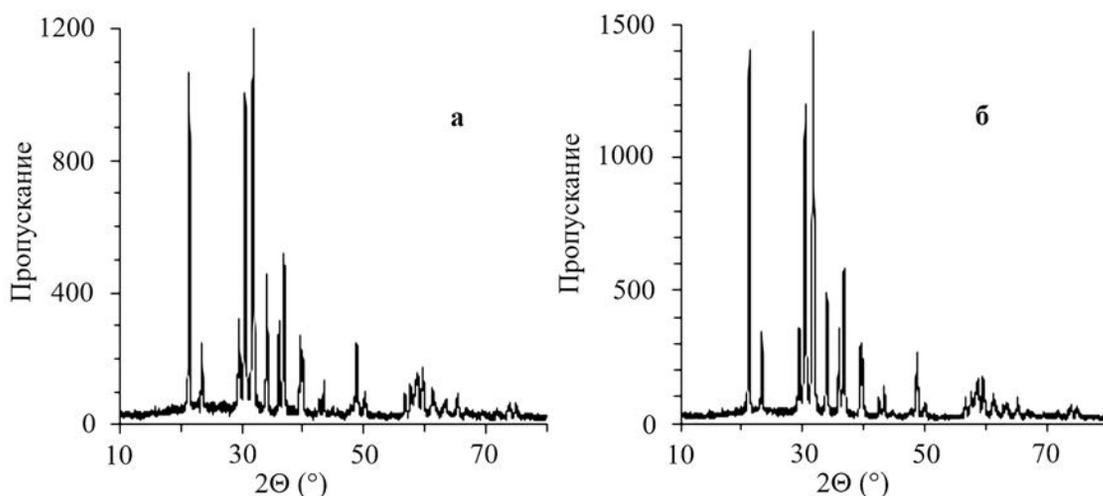


Рисунок 3. Рентгенограммы образцов: а – Li_2CO_3 без очистки; б - Li_2CO_3 с очисткой

безопасность ЛИА, но и увеличить срок их службы за счет снижения деградиционных процессов. На рис. 4 представлены результаты термического анализа стехиометрической смеси исходных компонентов шихты (1) для синтеза LATP. Основная потеря массы (32 %) происходит до 400 °С, что вызвано разложением гидрофосфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ с выделением аммиака NH_3 [10]. Образование фазы LATP происходит при температуре выше 400 °С. Общая потеря массы составляла 35 %, потери массы при температуре выше 500 °С не происходило.

По данным рентгенофазового анализа после отжига шихты при 800 °С при использовании в качестве исходного компонента как нитрата алюминия $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, так и оксида алюминия $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, наряду с основным количеством LATP в результате взаимодействия образуются примесные соединения пирофосфата титана TiP_2O_7 и фосфата

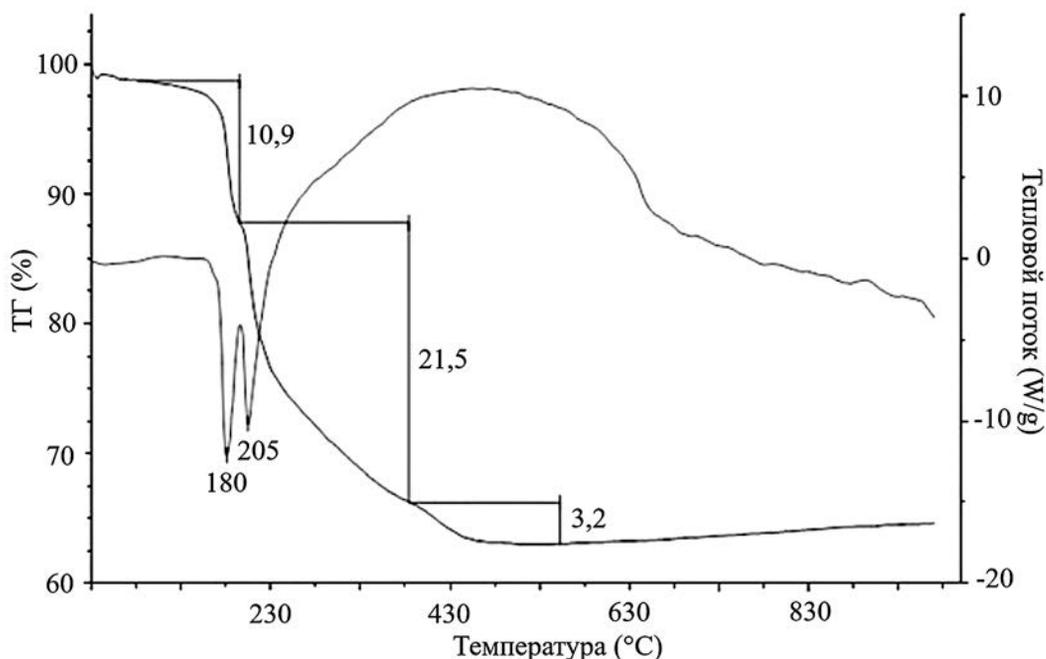


Рисунок 4. Термограмма смеси исходных компонентов шихты (1) для синтеза LATP

алюминия AlPO_4 (рис. 5). Авторы [10] также отмечали, что образование примесной фазы AlPO_4 является неизбежным при твердофазном синтезе. При дальнейшем повышении температуры до $1000\text{ }^\circ\text{C}$ при использовании нитрата алюминия образуется LATP с небольшим количеством ($\sim 6\%$) примесной фазы AlPO_4 , при использовании оксида алюминия образуется хорошо окристаллизованная фаза LATP со структурой NASICON (рис. 5).

Принципиальная технологическая схема получения твердого электролита LATP с использованием Li_2CO_3 , полученного в результате переработки сподуменового концентрата, представлена на рис. 6.

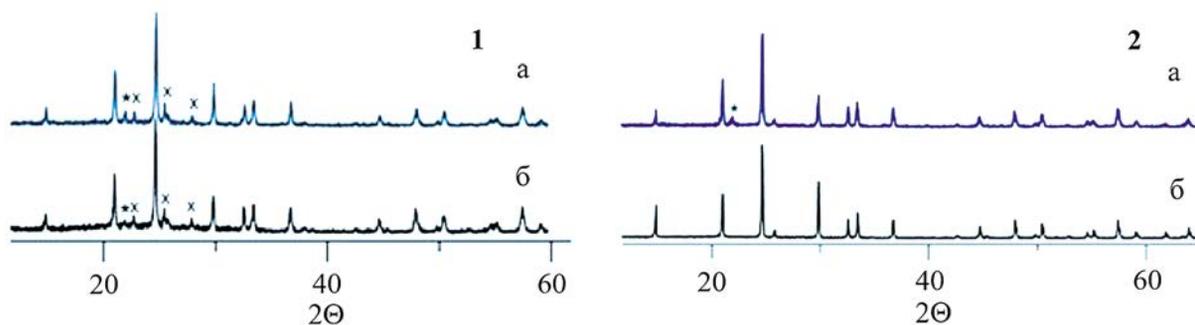


Рисунок 5. Дифрактограммы LATP после спекания при $800\text{ }^\circ\text{C}$ (1) и при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (2) при использовании $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (а) или $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (б). Обозначены: * – AlPO_4 , x – TiP_2O_7

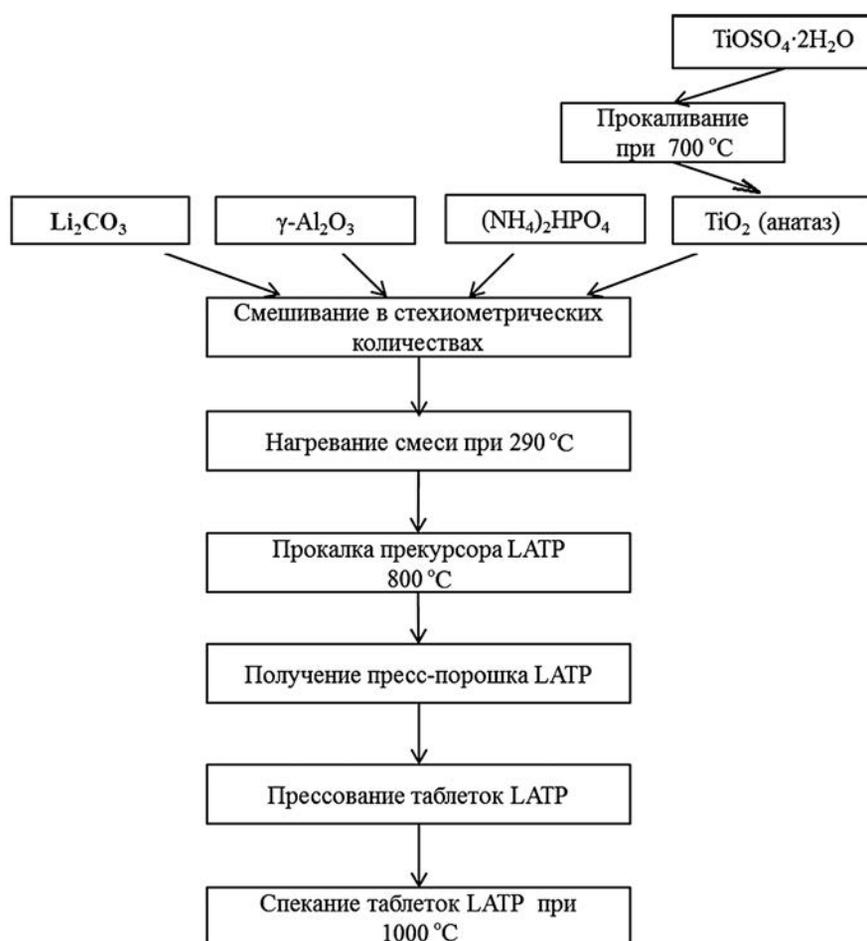


Рисунок 6. Принципиальная технологическая схема получения твердого электролита LATP

На рис. 7 представлены годографы импеданса LATP, синтезированного с использованием $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (рис. 7 а) и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (рис. 7 б). Значение общей ионной проводимости LATP, рассчитанное по формуле (3) с использованием оксида алюминия (на таблетках плотностью 84 %), достигало $1,7 \cdot 10^{-4}$ См/см при комнатной температуре, а при использовании нитрата алюминия – $1,8 \cdot 10^{-5}$ См/см. Эти результаты сопоставимы со значениями проводимости образцов LATP идентичного состава, представленными в литературе [11, 12], и подтверждают тот факт, что необходимым условием достижения высокой проводимости LATP является синтез монофазного продукта.

Наряду с величиной ионной проводимости важными характеристиками для твердых электролитов являются число переноса иона Li^+ (t_i) и электронная проводимость (σ_e). С электронными токами связан саморазряд аккумуляторов, поэтому зачастую электронной проводимостью лимитируется надежность работы и срок сохранности таких устройств. Снижение электронной проводимости имеет решающее значение для применения полностью твердотельных ЛИА, поскольку высокая электронная проводимость в основном ответственна за образование дендритов [13]. Рассчитанное по формуле (4) значение электронной проводимости (σ_e) LATP составило $2,2 \cdot 10^{-8}$ См/см, что коррелирует с литературными данными, и на 4–5 порядков ниже величины ионной проводимости. Число переноса иона Li^+ , рассчитанное по формуле (5), составило 0,995, что указывает на то, что твердый электролит LATP является чисто ионным проводником.

Важной характеристикой для практического применения твердых электролитов является электрохимическая стабильность, которая определяет рабочее напряжение твердотельного аккумулятора. Мерой электрохимической стабильности служит электрохимическое окно, представляющее собой диапазон потенциалов, между которыми

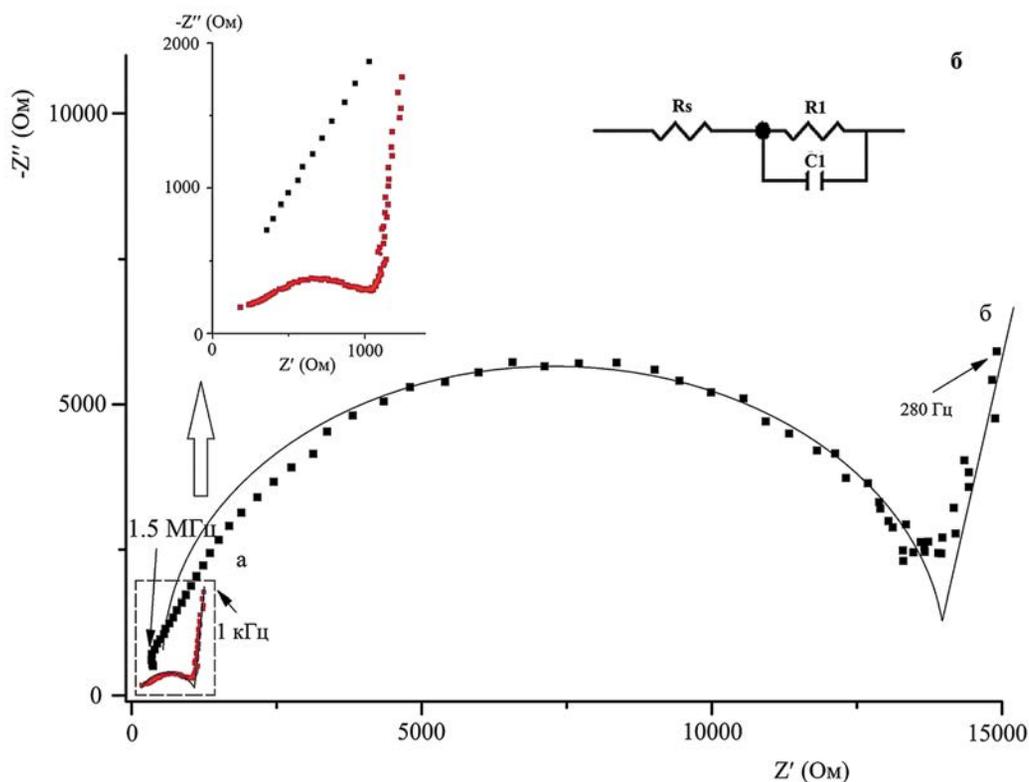


Рисунок 7. Годографы импеданса LATP, синтезированного с использованием $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (а) и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (б)

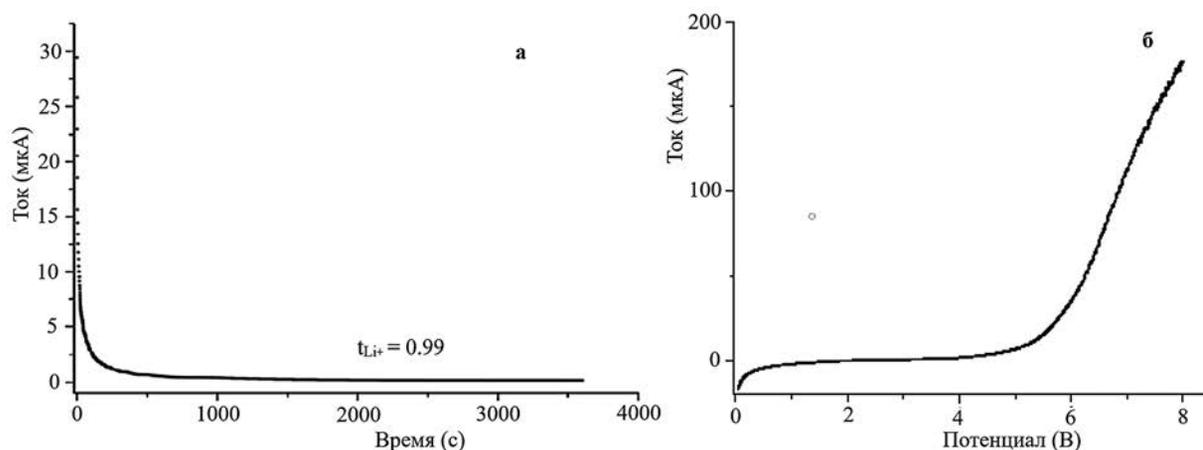


Рисунок 8. Хроноамперометрическая кривая LATP, измеренная при приложенном напряжении 1 В (а). Вольтамперная кривая с линейной разверткой для твердого электролита LATP в ячейке Li/LATP/C (б)

электролит не окисляется и не восстанавливается. На вольтамперной кривой наблюдается плато в интервале 0,5–5,5 В (рис. 8 б), затем происходит резкое увеличение тока на несколько порядков, что свидетельствует о разложении электролита [14]. Таким образом, LATP обладает электрохимической устойчивостью в широком диапазоне относительно Li/Li^+ , что открывает возможности его использования в высоковольтных ЛИА с большинством катодных материалов (LiCoPO_4).

Выводы

Проведено исследование извлечения лития в виде Li_2CO_3 из растворов водного выщелачивания спека, полученного в ходе серно кислотного выщелачивания b-сподумена Колмозерского месторождения. На основании результатов были определены оптимальные параметры предварительной очистки растворов сульфата лития от Al, Fe, Mg и Ca. Установлено, что повысить степень извлечения лития возможно путем изменения порядка введения раствора сульфата лития в раствор карбоната натрия. Введение дополнительных операций (промывки и перекристаллизации) позволяет увеличить эффективность процесса карбонизации и повысить чистоту продукта.

Исследован процесс синтеза порошков твердых электролитов со структурой NASICON состава $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) с использованием Li_2CO_3 , полученного в результате переработки сподуменного концентрата.

Установлено, что использование Li_2CO_3 без дополнительной очистки при синтезе LATP обеспечивает образование монофазного продукта в соответствии с представленной принципиальной технологической схемой. Этот результат можно объяснить относительно невысоким содержанием Li_2O (5,06 мас. %) в конечном продукте. Ионная проводимость синтезированного твердого электролита LATP составила $1,7 \cdot 10^{-4}$ См/см при комнатной температуре, а электронная находилась на уровне 10^{-8} См/см. Число переноса иона Li^+ составило 0,995. Соотношение между ионной и электронной проводимостью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалам для разработки твердотельных устройств на их основе.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Dong L., Jiao F., Liu W., Wang C., Wang D., Qin W. A novel approach for extracting lithium from overhaul slag by low temperature roasting – water leaching. Chemical Engineering Journal, 2024. V. 481, 148571.

- 2) Zhang, X., Aldahri, T., Tan, X., Liu, W., Zhang, L., Tang, S., Efficient co-extraction of lithium, rubidium, cesium and potassium from lepidolite by process intensification of chlorination roasting. *Chem. Eng. Proces.* 2020. V. 147, 107777.
- 3) Толкушина Е.А., Троицова М.В., Комин М.Ф. Минерально-сырьевая база лития: проблемы развития и использования. // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление.* 2012. № 2. С. 2-9.
- 4) Kuang G, Liu Y, Li H, Xing S.Z., Li F.J., Guo H. Extraction of lithium from β -spodumene using sodium sulfate solution. *Hydrometallurgy.* 2018. V. 177. 49–56.
- 5) Rosales GD, Ruiz MC, Rodriguez MH. Novel process for the extraction of lithium from β -spodumene by leaching with HF. *Hydrometallurgy.* 2014. V. 147–148, 1–6.
- 6) Peng JZ. Analysis of the domestic production technology and economic benefit of lithium carbonate. *Journal of Salt Science and Chemical Industry.* 2019. 48(10), 18–20.
- 7) Куншина Г.Б., Ефремов В.В., Локшин Э.П. Микроструктура и ионная проводимость титанофосфата лития-алюминия // *Электрохимия.* 2013. Т. 49. № 7. С. 808–814.
- 8) La Monaca A., Zhu W., Feng Z., Bertoni G., Campanella D., Girard G., Savoie S., Gheorghe Nita A., Clement D., Demers H., Vijn A., Rosei F., Paoella A. Influence of rutile and anatase TiO_2 precursors on the synthesis of a $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ti}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$ electrolyte for solid-state lithium batteries // *J. Electrochem. Soc.* 2022. V. 169. 040515.
- 9) Касиков А.Г., Щелокова Е.А., Яковлев К.А., Коровин В.Н., Глуховская И.В. Сернокислотное выщелачивание сподуменового концентрата Колмозерского месторождения. *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки.* 2023. Т. 14. № 2. С. 102–106.
- 10) Campanella D., Krachkovskiy S., Faure C., Zhu W., Feng Z., Savoie S., Girard G., Demers H., Vijn A., George C., Armand M., Belanger D., Paoella A. Influence of AlPO_4 Impurity on the electrochemical properties of NASICON-type $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ solid electrolyte // *ChemElectroChem.* 2022. V. 9. e202200984.
- 11) Ren Y., Deng H., Zhao H., Zhou Z., Wei Z. A simple and effective method to prepare dense $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ solid-state electrolyte for lithium-oxygen batteries // *Ionics.* 2020. V. 26. P. 6049–6056.
- 12) Куншина Г.Б., Бочарова И.В., Иваненко В.И. Влияние режимов термообработки на ионпроводящие свойства титанофосфата лития-алюминия // *ЖПХ.* 2017. Т. 90. Вып. 3. С. 312–317.
- 13) Han F., Westover A.S., Yue J., Fan X., Wang F., Chi M., Leonard D.N., Dudney N.J., Wang H., Wang C. High electronic conductivity as the origin of lithium dendrite formation within solid electrolytes // *Nature Energy.* 2019. V. 4. P. 187–196.
- 14) Liang X., Han D., Wang Y., Lan L. and Mao J. Preparation and performance study of a PVDF–LATP ceramic composite polymer electrolyte membrane for solid-state batteries // *RSC Adv.* 2018. V. 8. P. 40498–40504.



ПОЛУЧЕНИЕ ФТОРИДНЫХ СОЛЕЙ ЦИРКОНИЯ И ГАФНИЯ

Копарулина Е.С., Зиганшин А.Г., Кучин В.В., Винцайтис Е.Н.
АО «Чепецкий механический завод», г. Глазов, Удмуртская Республика, Россия
e-mail: EISKoparulina@rosatom.ru

Аннотация. В основу отечественного производства ядерного циркония заложена кремнефторидная перекристаллизационная схема [1]. Использование данного метода в 50–80-е годы определялось рядом факторов: простотой процесса разделения фторидно-калиевых солей циркония и гафния, требуемым в то время содержанием гафния не более 1000 ppm в циркониевых сплавах; отсутствием необходимости получения чистых солей гафния и сплавов на его основе.

Предпосылки создания усовершенствованной схемы: потребность в цирконии с содержанием гафния не более 100 ppm, ужесточение природоохранных требований к сбрасываемым промышленным отходам, низкая степень извлечения циркония из сырья в готовую продукцию, необходимость получения гафниевых сплавов.

В представленной работе в качестве исходного сырья были задействованы цирконий-концентрат производства АО «Туганский ГОК «Ильменит» и бадделитовый концентрат производства АО «Ковдорский ГОК».

Основным методом извлечения циркония и гафния и очистки их от примесей являлась экстракция ТБФ из азотнокислых растворов.

Разработанная технологическая схема, в отличие от действующей кремнефторидной перекристаллизационной, позволяет использовать исходное сырье с более высоким уровнем примесей, содержит меньшее количество технологических операций (9–13 стадий перекристаллизации заменены экстракцией), позволяет получать в одном экстракционном цикле особо чистый цирконий и высококонцентрированный гафний, снижает количество сбрасываемых маточных растворов.

Ключевые слова: концентрат, цирконий, гафний, выщелачивание, фторцирконат (гафнат) калия, экстракция, экстрагент, кислота азотная, центробежный экстрактор.

В АО ЧМЗ на базе ЦНИЛ проведены лабораторные исследования экстракционной схемы получения кристаллов ФЦК из продуктов вскрытия циркониевых концентратов производства АО «Туганский ГОК «Ильменит» и АО «Ковдорский ГОК». За основу взят штатный процесс переработки циркониевого сырья в АО ЧМЗ. Из штатной схемы были исключены следующие операции: очистка раствора ФЦК от примесей кремния, титана, алюминия и железа; дробная перекристаллизация. В качестве основной очистной операции использован экстракционный аффинаж.

Проведённая работа преследовала цель модернизировать процесс получения кристаллов ФЦК и ФГК путём расширения номенклатуры сырья для производства циркония (гафния) и сокращения технологического процесса.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- изучение процесса прямого получения кристаллов ФЦ(Г)К для экстракции без проведения кислотной обработки растворов (пульп) и дробной перекристаллизации после выщелачивания плава фторидов;
- изучение процесса получения исходного азотнокислого раствора для экстракции из обесфторенного гидроксида циркония (гафния);

- изучение процесса экстракционного извлечения и разделения циркония и гафния, очистки от примесей.

В лабораторных условиях опробована схема получения кристаллов ФЦК и ФГК из продуктов вскрытия циркониевого концентрата (рис. 1), предусматривающая экстракционный аффинаж вместо процесса дробной перекристаллизации.

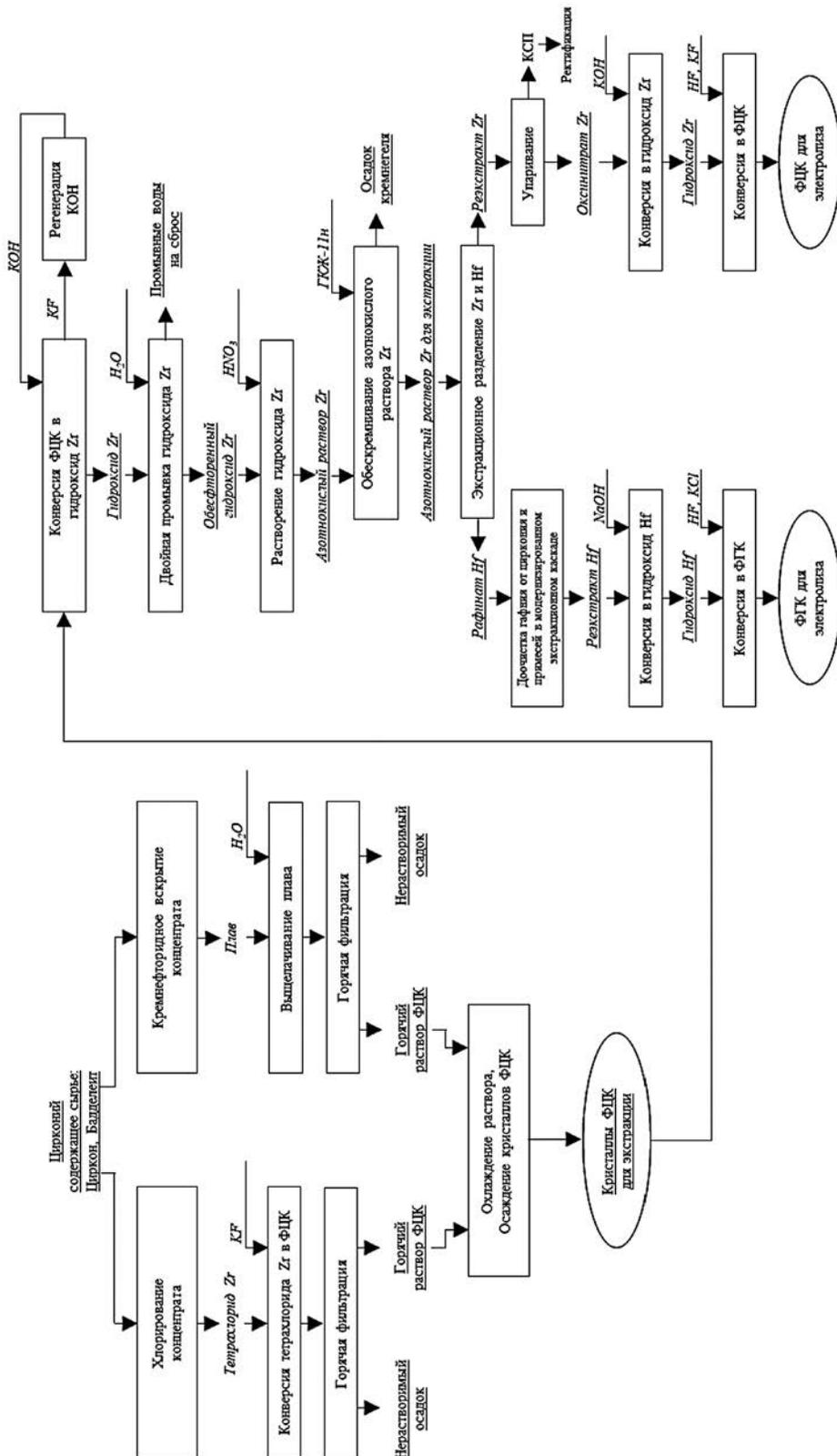


Рисунок 1. Технологическая схема процесса получения кристаллов ФЦК, предусматривающая экстракционный аффинаж

Преимущество экстракционной очистки заключается в возможности работы с исходными циркониевыми концентратами любой степени загрязненности по химическим примесям.

Разработанная схема получения кристаллов ФЦК из продуктов вскрытия циркониевого концентрата включает в себя следующие стадии:

- вскрытие концентрата;
- выщелачивание продуктов вскрытия циркониевых концентратов водой;
- осветление пульпы и отмывка кеков;
- горячая фильтрация;
- получение кристаллов ФЦК из продуктов вскрытия;
- переработка маточных растворов;
- конверсия кристаллов ФЦК в гидроксид циркония;
- приготовление исходного азотнокислого раствора для экстракции;
- обескремнивание исходного раствора для экстракции;
- экстракция с получением ФЦК и ФГК для электролиза.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Патент РФ 2263074 «Способ получения гексафторцирконата калия, очищенного от гафния». Бутя Е.Л., Свиридов А.М., Черемных Г.С., Штуца М.Г.

РОЛЬ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ВИДОВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ РОССИИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

*Лаломов А.В.
ИГЕМ РАН, lalomov@mail.ru*

Россыпные месторождения играли (а по ряду компонентов и сейчас играют) важную роль в обеспечении стратегических видов минерально-сырьевой базы как России, так и мира в целом. Россыпи обладают рядом преимуществ, которые делают их востребованными горнодобывающей промышленностью: относительно неглубокое (часто – доступное для открытой добычи) залегание, дезинтегрированное состояние продуктивных отложений, простота процессов обогащения (преимущественно – гравитационные системы), а также возможность быстрого вовлечения в эксплуатацию, что значительно сокращает сроки окупаемости вложенных средств. Все это еще более актуально для современной России, когда в кратчайшие сроки в условиях дефицита кредитных ресурсов требуется осуществить программу импортозамещения и обеспечения страны дефицитными видами стратегического минерального сырья, такого, как золото, платиноиды, олово, редкие металлы, титан, хром, алмазы.

В перспективе до 2035 года в мире прогнозируется кратное – в 2–6 раз – увеличение потребления для подавляющего числа видов высокотехнологичных металлов [1], существенная часть которых добывается из россыпных месторождений. Хотя в последние десятилетия основное внимание горнодобывающей промышленности как России, так и мира в целом, сосредоточено на крупных коренных объектах, пусть даже с низкими содержаниями, но большими запасами полезных компонентов, сложившаяся в настоящее время в России ситуация требует разработки новых подходов к воспроизводству

минерально-сырьевой базы (МСБ) дефицитных видов стратегического минерального сырья России.

Золото. Несмотря на ведущую роль коренных месторождений, россыпи продолжают играть важную роль в добыче золота, что отличает Россию от других производителей золота в мире. На протяжении XX века основная часть золота добывалась из россыпных месторождений, и только в начале нашего века коренные месторождения стали преобладать, преимущественно за счет открытия и освоения новых крупных коренных источников. Россыпная добыча заметно падала со 120 т в 1990 г. до 55 т в 2009 г. (46 % от 1990 г.), но потом стала возрастать и к концу 2021 г. достигла 87,1 т (73 % от 1990 г.), что составляет 19,9 % от общей добычи (рис.) [2]. Добытое в 2021 г. россыпное золото было на 88,7 % компенсировано результатами, в первую очередь разведки, а также переоценки и постановки на учет новых запасов. Таким образом, продолжающаяся эксплуатация россыпных месторождений при минимальном вложении средств может на протяжении длительного времени обеспечивать от 15 до 20 % золотодобычи России.

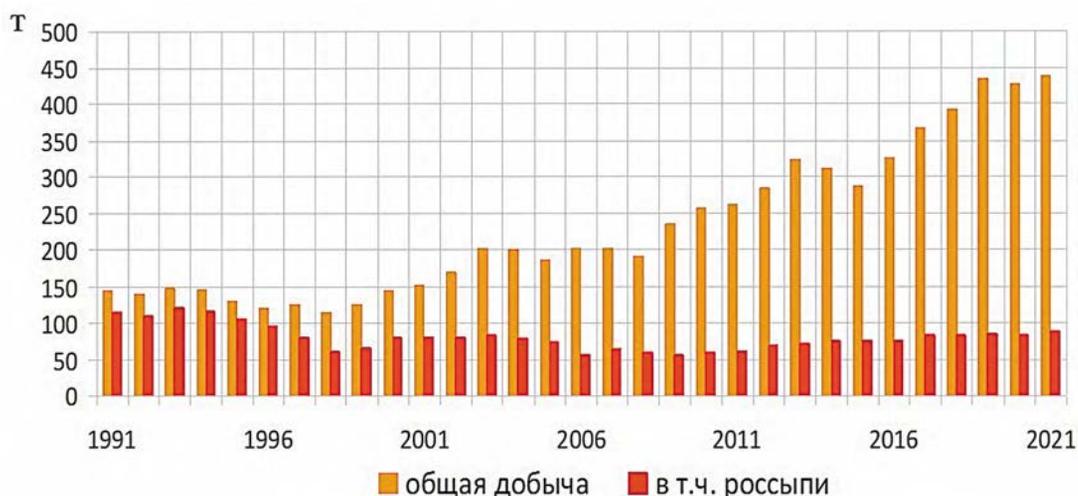


Рисунок. Структура добычи золота в России [2]

Олово. По общему количеству разведанных запасов олова Россия занимает первое место в мире. По категориям $A+B+C_1+C_2$ на государственном балансе числится 2110,3 тыс. т и, наряду с Бразилией (2000 тыс. т) и Китаем (1800 тыс. т) входит тройку мировых лидеров. Запасы олова в россыпях по категориям $A+B+C_1+C_2$ составляют 223,5 тыс. т (10,6 % общероссийских запасов) [3].

В 90-е годы оловодобыча в стране была практически свернута. Наиболее крупным из подготавливаемых к эксплуатации объектов является группа Пыркакайских штоков на Чукотке, запасы которых по категориям $A+B+C_1+C_2$ составляют 238,4 тыс. т олова при содержании 0,25 %. Не позднее августа 2031 г. должна начаться эксплуатация [3]. Вложения, необходимые для строительства ГОКа, на сегодняшний день оцениваются в 300 млн US\$. Учитывая низкие содержания олова, удаленность и сложные природные условия отработки руд Пыркакайского месторождения, его конкурентоспособность на мировом рынке олова вызывает ряд вопросов.

Что касается россыпных месторождений, компания АО «Янолово» летом 2021 г. возобновила разработку Тирехтяхской россыпи, по которой на государственном балансе

находится 68,2 тыс. т олова с содержанием 960 г/м³. Россыпь относится к аллювиально-делювиальному и аллювиальному типам. Ее запасы доступны для открытой отработки. Уже в первый год после возобновления эксплуатации на месторождении было добыто 452 т олова, а к 2025 году предприятие выйдет на проектную производительность 2,8 тыс. т олова в год, что полностью покрывает текущие потребности России. Ожидаемый срок отработки запасов – 2051 г. К россыпным месторождениям олова, отработка которых может быть начата в кратчайшие сроки, относятся прибрежно-морские россыпи Валькумейская на Чукотке (15,7 тыс. т при содержании 1260 г/м³), Чокурдах в Якутии (18,2 тыс. т при содержании 493 г/м³) и Одинокая в Якутии (51,9 тыс. т при содержании 829 г/м³) (табл. 1).

Таким образом, в обеспечении страны оловом преимущества россыпей, которые требуют гораздо меньших вложений, а отдачу дают в течение уже первого года эксплуатации, по сравнению с коренными объектами являются неоспоримыми. Только стоящие на балансе россыпные запасы олова (233,5 тыс. т) могут обеспечить текущие потребности страны приблизительно на 100 лет.

Таблица 1
Параметры основных оловянных россыпей России

Месторождение	Запасы, тыс. т	Содержания, г/м ³	Видимое потребление на 2021 г., тыс. т	Обеспеченность, лет
Тирехтах	68,2	960		
Одинокая	51,9	829		
Чокурдах	18,2	493		
Валькумей	15,7	1260		
Сумма 4–х	154,0		2,6	59
Всего в России	223,5		2,6	86

Титан. Согласно Стратегии развития минерально-сырьевой базы до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 22.12.2018 № 2914-р, титан относится к группе дефицитных полезных ископаемых, внутреннее потребление которых в значительной степени обеспечивается вынужденным импортом. Кроме того, титан входит в перечень основных видов стратегического минерального сырья, утвержденный распоряжением Правительства РФ от 30.01.2022 № 2473-р.

Россия располагает одной из крупнейших в мире сырьевых баз титана – на ее долю приходится 15 % запасов мира. При этом вклад страны в мировое производство концентратов титана составляет всего 0,03 %. Из-за дефицита сырья завод «Крымский титан» работает только на 25 % от возможного объема переработки (230 тыс. т/год ильменитового концентрата). Поэтому обеспечение российской титановой промышленности собственным сырьем является крайне насущной проблемой.

Российская сырьевая база титана на 97 % состоит из месторождений магматогенного генезиса в габброидных и щелочных породах и литифицированных погребенных россыпей, относимых по условиям эксплуатации к коренным рудам. В мире 60–70 % титановых концентратов производится из комплексных россыпных месторождений. Эксплуатируемые в мире коренные объекты отличаются от стоящих на балансе российских повышенными содержаниями титана. К тому же российские месторождения испытывают большие проблемы с технологией обогащения и переработки руд [3, с. 319, 322]. Ряд месторождений расположен в удаленных слабоосвоенных районах.

Россыпные месторождения представлены погребенными древними (от юрских до плиоценовых) прибрежно-морскими россыпями, расположенными в пределах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ (табл. 2).

Таблица 2

Параметры основных комплексных редкометалльно–титановых россыпей России

Месторождение	TiO ₂		ZrO ₂		Расположение
	Запасы, тыс. т	Ср. сод., кг/м ³	Запасы, тыс. т	Ср. сод., кг/м ³	
Восточно–Европейская мегапровинция					
Бешпагирское	2630	20,9	620,6	5,1	Ставропольский край
Центральное	6396	24,1	830,3	3,1	Тамбовская область
Лукояновское	166	5,5	346,4	13,0	Нижегородская область
Новозыбковское	237	8,1	27,6	1,7	Брянская область
Западно–Сибирская мегапровинция					
Тарское	1001	32,2	181,4	6,4	Омская область
Самсоновское	1674	34,2	256,6	5,2	Омская область
Туганское	2502	19,7	1007,3	7,7	Томская область
Георгиевское	1568	17,6	408,8	4,9	Томская область
Ордынское	56	14,4	15,3	3,9	Новосибирская область
Буткинское	133	16,8	12,3	1,8	Свердловская область
Правобережное	270	20,0	30,7	2,6	ХМАО

Ввод в эксплуатацию в декабре 2021 г. первой очереди АО «Туганский ГОК «Ильменит» на россыпном циркон-рутил-ильменитовом Туганском месторождении в Томской области при выходе на полную мощность в 2029 г. позволит выпускать 136,6 тыс. т/год ильменитового и 9,4 тыс. т/год рутил-лейкоксенового концентратов. Учитывая видимое потребление концентратов титана на 2021 г. 226,8 тыс. т [3], при выходе на полную мощность комбинат сможет покрыть текущие потребности России на 64 %. Срок отработки всех запасов месторождения оценивается в 43–45 лет.

Среди месторождений нераспределенного фонда недр наиболее перспективными для освоения являются погребенные прибрежно-морские россыпи Бешпагирского россыпного узла Ставропольского края, они покроют еще 17 % потребностей России.

Таким образом, ввод в эксплуатацию россыпных редкометалльно-титановых месторождений России может в кратчайшие сроки обеспечить основную часть потребностей в титановом сырье и снизить зависимость отечественной промышленности от импорта. Россыпные месторождения титана, запасы которых оцениваются в 17,8 млн т, могут обеспечить текущие потребности страны на срок до 80 лет.

Редкие металлы (РМ). Цирконий. Россия располагает крупной сырьевой базой циркония, достаточной для обеспечения внутренних потребностей страны: на 01.01.2022 на государственном балансе по категориям находилось 12,4 млн т ZrO₂.

На долю циркон-рутил-ильменитовых россыпных месторождений, с которыми за рубежом связано 80 % запасов и 95 % добычи, в России приходится 33 % запасов (3,9 млн т ZrO₂), заключенных в 10 месторождениях, но промышленностью они практически не освоены.

Руды коренных объектов относятся к труднообогатимым. Разработанные технологические схемы переработки руд требуют применения сложных развернутых

многостадийных технологических процессов (циклы флотационного, гравитационного и электромагнитного обогащения, химико-металлургический передел) [3].

Туганское месторождение в Томской области с запасами около 1 млн т ZrO_2 , освоение которого началось в 2021 г., после вывода ГОКа на полную мощность к 2029 г. сможет ежегодно давать 44,2 тыс. т цирконового концентрата. Учитывая, что видимое потребление цирконового концентрата в России составляет 9,9–11,6 тыс. т/год, это позволит полностью обеспечить потребности страны и возможность экспорта как концентратов, так и изделий из циркония на протяжении более чем 20 лет. Дополнительными источниками могут служить Лукояновское россыпное месторождение в Нижегородской и Бешпагирское в Ставропольском крае.

Таким образом, внутренние потребности России и экспортный потенциал по цирконю могут в кратчайшие сроки и с минимальными затратами быть обеспечены за счет россыпных месторождений на десятки лет.

Ниобий, тантал, редкоземельные металлы (РЗМ). Балансовые запасы редких металлов (РМ) учтены только в коренных месторождениях. Значительная часть месторождений находится в удаленных труднодоступных районах и требует крупных капиталовложений, что делает маловероятным их освоение и эксплуатацию в ближайшие 10–15 лет и требуют преференций, предоставляемых государством [4].

В настоящее время единственным действующим источником РМ в России является Ловозерский горно-обогатительный комбинат, разрабатывающий месторождение лопарита Ловозерского массива – источника ниобия, тантала, редких земель и титана. Добыча ведется в сложных горно-геологических условиях при низкой рентабельности существующих разрезов. Горнотехническая авария и закрытие Умбозерского рудника существенно сократили потенциал развития месторождения.

Дополнительным источником редкоземельного сырья комбината могут служить разведанные россыпи лопарита, расположенные на северном обрамлении Ловозерского массива, а также техногенные отвалы – хвосты обогатительной фабрики Карнасурт.

Наиболее перспективным по совокупности параметров является Сергеваньский участок Ревдинской (Северной) россыпи. Он расположен в непосредственной близости вниз по долине от хвостохранилища ГОКа [5]. Проведенные минералого-технологические исследования показали, что руды Сергеваньского участка могут обогащаться по гравитационно-магнитной схеме, что позволит получить промышленный лопаритовый концентрат для редкометалльной промышленности [6]. Учитывая текущую годовую производительность Ловозерского ГОКа по производству лопаритового концентрата, отработка только одного Сергеваньского участка способна обеспечить поставки лопаритового концентрата на протяжении 68 лет. При этом, в отличие от строительства нового коренного рудника, отработка россыпи не потребует значительных и долговременных финансовых вложений, концентрат может быть получен уже к концу первого года после начала отработки, а технологическая схема не потребует дорогостоящей и энергозатратной операции дробления. Для оценки экономических параметров отработки россыпи необходимо проведение технико-экономического обоснования эксплуатации, основанного на современных реалиях (стоимость продукта, энергозатрат и т. д.).

Таким образом, лопаритовые россыпи Ловозерского массива могут служить альтернативным или дополнительным источником редкометалльного сырья, способного обеспечить потребности нашей страны на протяжении десятков лет. Они могут быть вовлечены в эксплуатацию в кратчайшие сроки и с минимальными затратами, что дает им преимущества по сравнению с коренными объектами.

Алмазы. По состоянию на 01.01.2022 балансовые запасы алмазов составляют 1 018,9 млн кар, которые заключены в 65 месторождениях (20 коренных и 45 россыпных) [3]. Россыпные объекты вмещают 6,8 % запасов алмазов и обеспечивают 11 % добычи в объемном выражении. Здесь надо учитывать, что россыпные алмазы обладают более высоким качеством, чем коренные. Следствием этого является их более высокая рыночная цена. Так, средняя цена российских алмазов (преимущественно, коренных) – 67,6 долл./кар., а алмазов Урала в месторождениях Вишерского района составляет 450–500 US\$/карат [7]. Таким образом, значение россыпных алмазов в стоимостном отношении (особенно в классе ювелирных камней) значительно выше, чем в объемном. Учитывая высокую стоимость россыпных алмазов, их значение в балансе добычи в стоимостном выражении сопоставимо со значением коренных кимберлитовых месторождений.

Таблица 3

Доля россыпей различных типов в структуре запасов и добычи (по [2, 8, 9])

Вид сырья	Доля запасов категорий А+В+С ₁ (≈ measured resources) россыпей, %	Доля россыпей в общей добыче, %
Золото (Россия) в 2021 г.	10,2	19,9
Платиноиды (Россия)	0,3	4,5
Алмазы (Россия) (карат)	6,8	11,0
Олово (СССР, 1989 г.)	12,4	25
Олово (мир)	46,6	65
Титан (мир)	33	70
Цирконий (мир)	80	95
Ниобий (мир, с корами выветривания)	20	70
Тантал (мир, с корами выветривания)	4	>10
Вольфрам (с ТМО*)	0,73	3,2
Хром (Россия)	0,56	1,14

* ТМО – техногенно–минеральные образования.

Анализируя данные табл. 3, мы видим, что практически по всем компонентам доля россыпей в балансе добычи превышает их долю в балансе запасов. Из этого следует, что, несмотря на валовое преобладание в балансе запасов коренных месторождений, востребованность россыпей в горнодобывающей промышленности является весьма высокой. Это объясняется следующими факторами:

- относительно неглубокое залегание промышленного пласта (десятки метров), позволяющее проводить отработку открытым карьером; для глубокозалегающих россыпей возможно применение метода СГД, который по эффективности сопоставим с открытой отработкой;
- технологическая простота процессов обогащения, не требующая сложных технологий (преимущественно гравитационное обогащение);
- энергетическая эффективность процессов обогащения, исключающая дробление материала, на которое уходит 50 % энергетических затрат при разработке коренных месторождений;
- быстрое (часто в течение одного сезона) начало отдачи средств, вложенных в добычу россыпей.

Отработка россыпных месторождений не просто экономически выгодна; в ряде случаев она дает возможность в кратчайшие сроки и с минимальными затратами решить

для нашей страны проблему импортозамещения и обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы дефицитных видов стратегического минерального сырья. Это особенно актуально в наше непростое время, когда России трудно рассчитывать на международное кредитование горнодобывающей промышленности, а поставки сырья по импорту имеют высокие логистические риски.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Гос. задания ИГЕМ РАН.

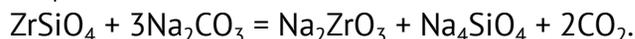
ЛИТЕРАТУРА

- 1) Бортников Н.С., Волков А.В., Лаломов А.В. и др. Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России // Геология рудных месторождений. Т. 64. № 6. 2022. С. 617–633. DOI: 10.31857/S0016777022060028.
- 2) Лаломов А.В., Владимирцева О.В., Бочнева А.А. Роль россыпных месторождений в золотодобывающей промышленности России // Золото и технологии. 2022а. No 4 (58) 2022. С. 36–44.
- 3) Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году». М.: ВИМС-ЦНИГРИ. 2022. 622 с.
- 4) Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 97–119. DOI: 10.1134/S1075701516020021.
- 5) Лаломов А.В., Григорьева А.В., Зайцев В.А. Минеральный состав редкометалльных россыпей Ловозерского массива // Геология рудных месторождений. 2022б. № 5. С. 485–497. <https://doi.org/10.31857/S0016777022050069>.
- 6) Левченко Е.Н., Лаломов А.В., Григорьева А.В., Зайцев В.А. Минералого-технологическое исследование лопаритовых россыпей Ловозерского массива // Обогащение руд. 2023. № 1. С. 29–37. DOI: 10.17580/or.2023.01.05.
- 7) Чуйко В.А., Синкин В.А., Наумов В.А. и др. Сюзёвское месторождение россыпных алмазов: новый этап изучения алмазоносности Западного Урала // Литосфера. 2023. 23(4):701–713. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-701-713>.
- 8) Павловский А.Б. Оловянные руды // Большая российская энциклопедия. Т. 24. М., 2014. С. 121.
- 9) U.S. Geological Survey, 2020, Mineral commodity summaries 2020: U.S. Geological Survey, 200 p., <https://doi.org/10.3133/mcs2020>.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ОБЕСКРЕМНИВАНИЯ СОЛЯНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОКСИХЛОРИДА ЦИРКОНИЯ

*Майников Д.В., Радушинский С.М., Толкачев В.А.
АО «ВНИПИпромтехнологии», г. Москва*

В технологии переработки цирконийсодержащих руд известен способ [1], при котором исходный материал спекают с содой с образованием цирконатов натрия по реакции:



Образующийся спек измельчают и выщелачивают водой с целью удаления основного количества кремния в виде растворенного ортосиликата натрия. Полученные осадки после водного выщелачивания обрабатывают соляной кислотой с переводом циркония в раствор в виде оксихлорида (ZrOCl_2).

При солянокислой обработке спеков в раствор также переходят оставшиеся кремнийсодержащие соединения в виде кремниевой кислоты. Наличие соединений кремния в солянокислых растворах негативно сказывается на дальнейшей переработке циркониевых материалов, в частности, на разделении циркония и гафния. В атомной промышленности применяют цирконий с содержанием не более 0,01 % Hf при суммарном содержании гафния в исходном циркононом сырье до 2,5 %. Эффективное разделение циркония и гафния проводят экстракционным способом, при этом в исходном растворе содержание кремния не должно превышать 100–120 мг/л.

В АО «ВНИПИпромтехнологии» с целью изучения процесса обескремнивания солянокислых цирконийсодержащих растворов были проведены лабораторные исследования.

В качестве исходного материала были подготовлены модельные растворы (суспензии) с концентрацией циркония и кремния 150 и 5 г/л соответственно.

Для осаждения кремнийсодержащих соединений использовали гидрофобизирующую кремнийорганическую жидкость ГКЖ-11, которую в виде 10 %-ного раствора добавляли при перемешивании в суспензию при различных расходах, температуре и продолжительности контакта (перемешивания). Результаты исследований представлены в виде графических зависимостей на рис. 1–3.

Полученные результаты демонстрируют, что добавка ГКЖ в количестве всего 5 об. % ведет к снижению концентрации кремния в растворе с 5000 до 380 мг/л (рис. 1). Увеличение расхода ГКЖ до 15 об. % позволяет сократить содержания Si до ~300 мг/л при температуре процесса 60 °С и продолжительности перемешивания 30 минут.

Повышение температуры до 80 °С, при прочих равных условиях, способствует снижению содержания кремния в растворе до 120 мг/л (рис. 2), а увеличение продолжительности перемешивания (времени контакта фаз) до 3 часов позволяет еще дополнительно уменьшить концентрацию кремния в растворе до 80–85 мг/л, как показано на рис. 3.

На основании полученных результатов в качестве оптимальных условий осаждения кремния были выбраны следующие параметры:

- расход 10 % раствора ГКЖ – 15–20 об. %;
- температура осаждения – 80–85 °С;
- продолжительность контакта (перемешивания) – 3 ч.

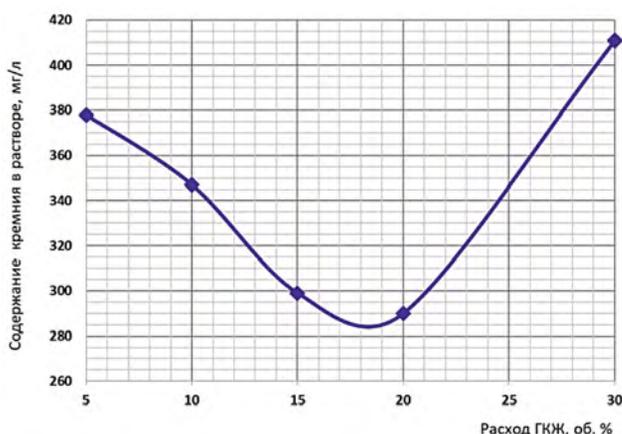


Рисунок 1. Влияние расхода ГКЖ на содержание кремния в растворе (при температуре 60 °C и времени перемешивания 30 минут)

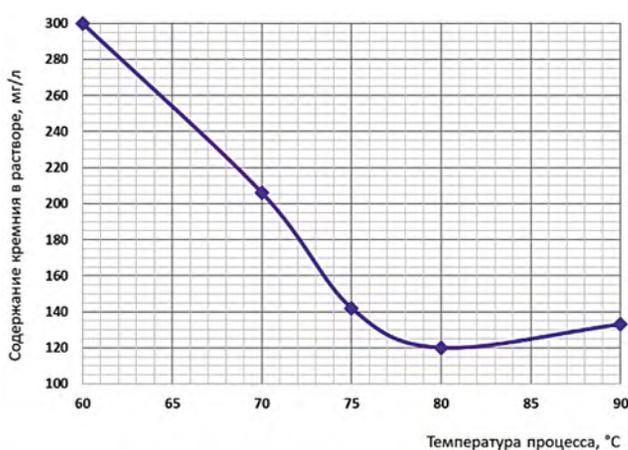


Рисунок 2. Влияние температуры процесса на содержание кремния в растворе (при расходе ГКЖ 15 об. % и времени перемешивания 30 минут)

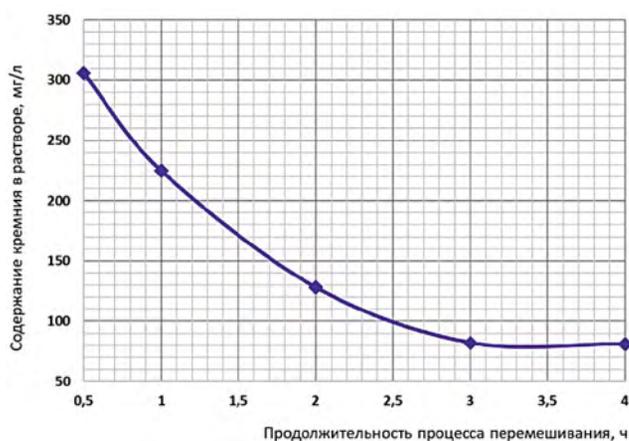


Рисунок 3. Влияние продолжительности процесса перемешивания на содержание кремния в растворе (при расходе ГКЖ 15 об. % и температуре 60 °C)

При таких условиях осаждения кремния, его остаточная концентрация в солянокислом растворе составила ~ 83–84 мг/л, что удовлетворяет требованиям для эффективного проведения процесса экстракционного разделения Zr и Hf. Общая концентрация циркония в растворе практически не изменяется, оставаясь на уровне 149–150 г/л.

Следует отметить, что кремний осаждается в растворе в виде гелеобразной массы, которая не отстаивается и не фильтруется. Для выделения геля из объема раствора использовали центрифугу. При центрифугировании в течение 5 минут при 5000 об/мин удалось получить относительно прозрачные фугаты, представленные на рис. 4.

Выход геля составляет 40–45 % от объема раствора, его влажность находится на уровне 70 %, вследствие чего значительное количество циркония может быть потеряно с жидкой фазой, связанной с гелем. С целью доизвлечения циркония из влажного осадка было предложено проводить репульсионную промывку кремнийсодержащего геля.

В ходе исследований установлено, что в случае использования промывной воды с удельным расходом 1,5 м³/т полученного геля и четырех ступеней репульсионной промывки с разделением фаз в центрифуге удается достигнуть эффективности отмывки циркония 97 %. Результаты процесса отмывки представлены в таблице. Внешний вид исходного и промытого геля показан на рис. 5.

В результате проведенных исследований был определен режим осаждения кремнийсодержащих соединений из солянокислых растворов,

образующихся в процессе получения оксихлорида циркония. Эффективность выделения кремния из раствора в осадок в результате добавки ГКЖ составила 98,3 %. Получаемый в ходе осаждения кремния гель рекомендовано промывать в режиме

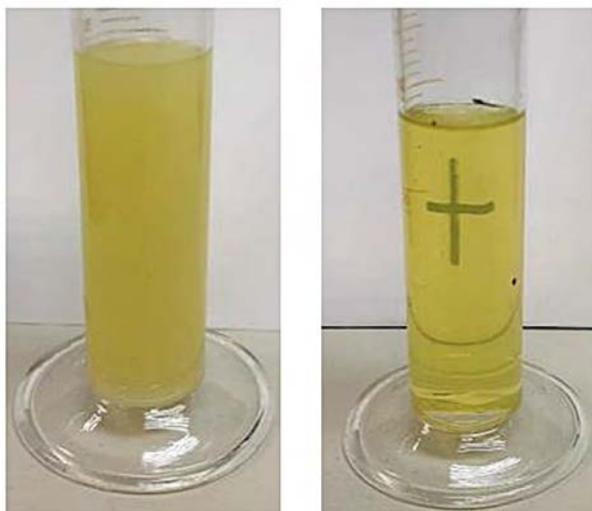


Рисунок 4. Результаты осветления цирконийсодержащих растворов при выделении кремния. Слева – исходный раствор, справа – раствор после центрифугирования

Таблица

Результаты процесса выделения кремния и отмывки циркония от кремнийсодержащего осадка

Наименование продукта	Содержание элементов, мг/л	
	Zr	Si
Исходный раствор	150000	5000
Основной раствор после очистки	149456	83,8
Раствор первой промывки геля	61312	8,2
Раствор второй промывки геля	22324	5,3
Раствор третьей промывки геля	8520	3,8
Раствор четвертой промывки геля	3317	4,1

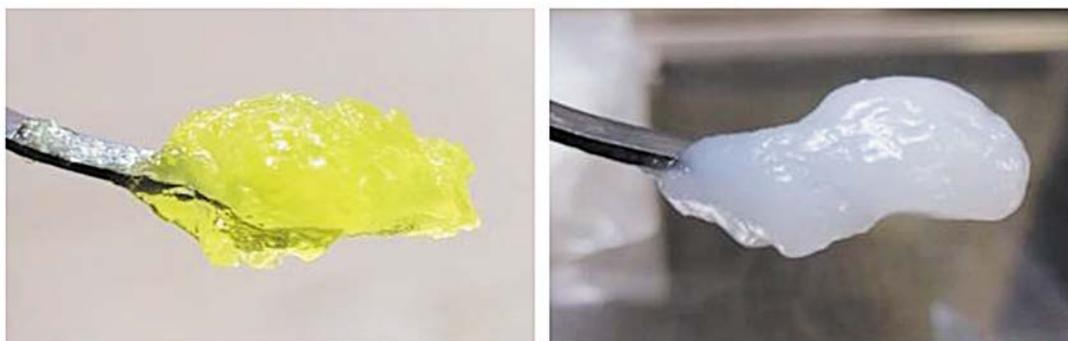


Рисунок 5. Внешний вид исходного и промытого геля. Слева – исходный гель, справа – промытый гель

противоточной четырехступенчатой репульпации с разделением фаз в центрифуге, что позволяет при удельном расходе промывной воды в количестве $1,5 \text{ м}^3/\text{т}$ геля достигнуть эффективности отмывки циркония не менее 97,2 %.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Зеликман А.Н. *Металлургия редких металлов: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп.* / А.Н. Зеликман, Б.Г. Коршунов. – М.: *Металлургия*, 1991. 432 с.

СОРБЦИОННАЯ ПЕРЕРАБОТКА ПРОДУКТИВНЫХ РАСТВОРОВ ОПУ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДОБРОВОЛЬНОЕ

Мешков Е.Ю. – 1, Татарников А.В. – 1, Андреева С.И. – 1, Соловьев А.А. – 1,
Трошкина И.Д. – 2, Бояркина Е.С. – 3
1 – АО «ВНИПИПромтехнологии», Москва,
2 – ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д.И. Менделеева», Москва,
3 – АО «Далур», Курганская область

Минерально-сырьевой базой АО «Далур» являются месторождения Зауральского урановорудного района – Далматовское, Хохловское и Добровольное [1]. Сохранения и увеличения объемов добычи урана на АО «Далур» возможно достичь за счет увеличения мощности добычного и перерабатывающего комплексов месторождения Хохловское и ввода в эксплуатацию месторождения Добровольное [1, 2].

Предполагаемая отработка месторождения Добровольное методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ) осложняется повышенной минерализацией пластовых вод водоносных горизонтов. При отработке месторождения оценочное содержание хлорид-ионов в продуктивных растворах (ПР) может составить 7,5 г/дм³ при общей минерализации до 50 г/дм³ [3, 4].

Основным методом переработки продуктивных растворов СПВ является сорбция урана на анионитах [3, 5]. Содержание хлорид-ионов в ПР в значительных количествах приводит к снижению емкости ионита по урану за счет конкурирующего влияния депрессирующих анионов хлора, что приводит к снижению производительности сорбционной технологии [3]. Определение оптимальной технологии сорбционной переработки продуктивных растворов с повышенным содержанием хлорид-ионов, обеспечивающей эффективное извлечение урана при минимальном снижении емкости ионита, является крайне важной задачей.

Целью настоящей работы являлось изучение сорбции урана ионитами различной функциональности и структуры из сернокислых растворов с повышенным содержанием хлорид-ионов с последующим определением типа сорбента в технологии переработки ПР при производстве работ на опытно-промышленной установке месторождения Добровольное АО «Далур». Состав исходного раствора сорбционной переработки представлен в табл. 1.

В работе были использованы образцы сорбентов, отобранные при предварительном изучении равновесия сорбции урана в статических условиях, а именно гелевые аниониты – АМП, Purolite A660 и макропористые – Purolite A560, Ambersep 920U (Amb920).

Сорбцию урана проводили в динамических условиях до достижения равенства концентраций урана в исходном растворе и в маточнике сорбции. Раствор подавали в нижнюю часть колонны через неподвижный слой ионита с расходом 250 см³/ч

Таблица 1

Состав исходного раствора для сорбционного извлечения урана

рН	Содержание в исходном растворе								
	г/дм ³		мг/дм ³						
	Cl ⁻	Fe	U	Al	Ca	Mg	Si	P	NO ₃ ⁻
1,5	7,5	0,87	25,2	392	306	111	3,0	0,2	81

при объеме ионита в колонне – 50 см³. Выходные кривые сорбции урана приведены на рис. 1.

В табл. 2 приведены основные показатели сорбции урана анионитами.

В результате проведенных исследований в динамических условиях было определено, что для сорбции урана из ПР скважинного подземного выщелачивания, содержащих 25 мг/дм³ урана и 7,5 г/дм³ хлорид-ионов при pH=1,5, оптимальными являются пиридиниевые иониты нового поколения, например Purolite A560 и A660, емкость которых по урану в этих условиях может составить 12–15 г/дм³, а необходимый слой ионита в колоннах сорбции СНК – 6÷8 метров при линейной скорости движения раствора 30÷40 м/ч. При этом десорбцию урана из анионитов осуществляют традиционным нитратно-сернокислым раствором.

Десорбционное концентрирование урана актуально при сорбции из бедных по урану растворов, особенно на фоне повышенного содержания хлорид-ионов – депрессора сорбции, когда содержание урана в насыщенном ионите невелико. В данном случае десорбционное концентрирование заключается в донасыщении ионита ураном с помощью товарного десорбата, в ходе которого не только увеличивается емкость по целевому элементу, но и эффективно вытесняется основной депрессор сорбции – хлорид-ион.

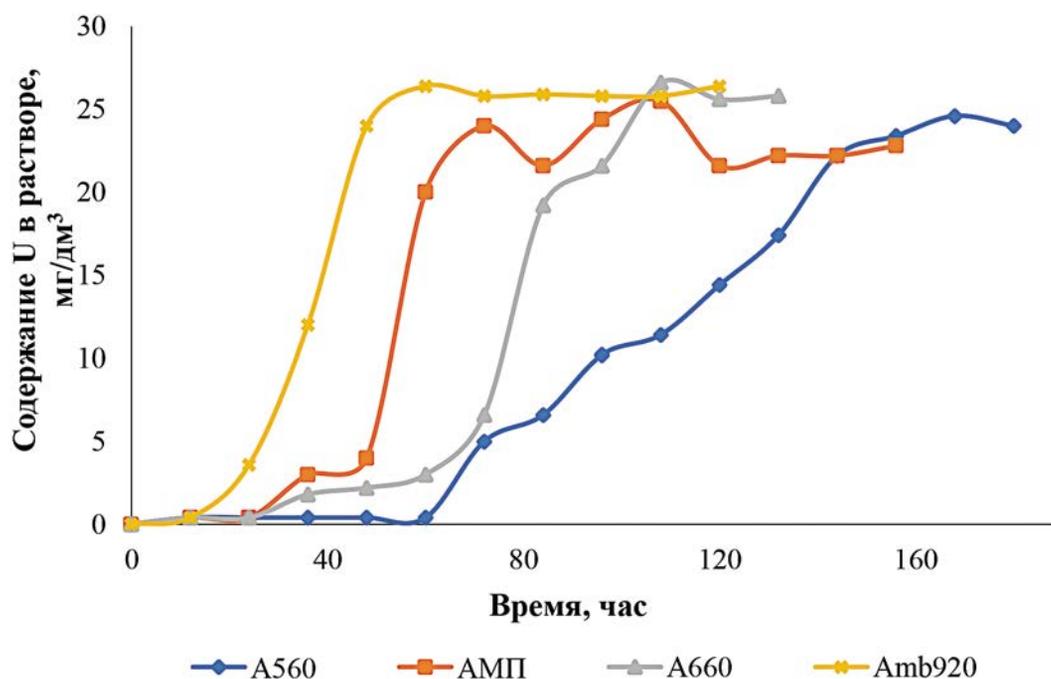


Рисунок 1. Выходные кривые сорбции урана анионитами

Таблица 2

Показатели сорбции урана анионитами

Анионит	Содержание в анионите, г/дм ³			K _к	β, час
	U	NO ₃ ⁻	Cl ⁻		
АМП	4,92	2,20	17,70	246	0,086
A560	13,63	1,90	16,20	598	0,055
A660	12,12	1,65	20,60	459	0,053
Ambersep 920U	5,27	3,15	11,34	200	0,067

При проведении предварительных лабораторных испытаний по донасыщению анионитов обратным десорбатом и десорбции донасыщенных анионитов определен удельный объем минимально необходимого десорбирующего раствора (ДР) и товарного десорбата (ТД), выводимого на донасыщение анионита при выводе в товарный десорбат $0,33 \text{ м}^3/\text{м}^3$ насыщенного анионита.

Исходя из целевого объема выводимого товарного десорбата – $0,33 \text{ м}^3/\text{м}^3$ насыщенного ионита, – концентрация урана в растворе, поступающем на донасыщение, должна быть втрое больше, чем в насыщенном анионите. Донасыщение ионита ураном проводили в динамических условиях при комнатной температуре. Раствор подавали в нижнюю часть колонны через неподвижный слой ионита с расходом $25 \text{ см}^3/\text{ч}$ при объеме ионита в колонне – 50 см^3 . Емкостные характеристики ионитов после донасыщения приведены в табл. 3.

Выходные кривые десорбции хлорид-ионов и сорбции урана на этапе донасыщения ионита десорбатом представлены на рис. 2–3.

Таблица 3

Емкостные характеристики ионитов после донасыщения

Анионит	Содержание в анионите					
	г/дм ³			мг/дм ³		
	U	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Fe	Al	Ca
АМП	31,84	49,5	1,40	49,0	20,4	85,7
А560	59,51	37,0	1,07	31,1	13,3	124
А660	56,90	39,0	2,35	42,9	9,52	157
Ambersep 920U	24,85	26,0	3,95	42,3	34,6	177

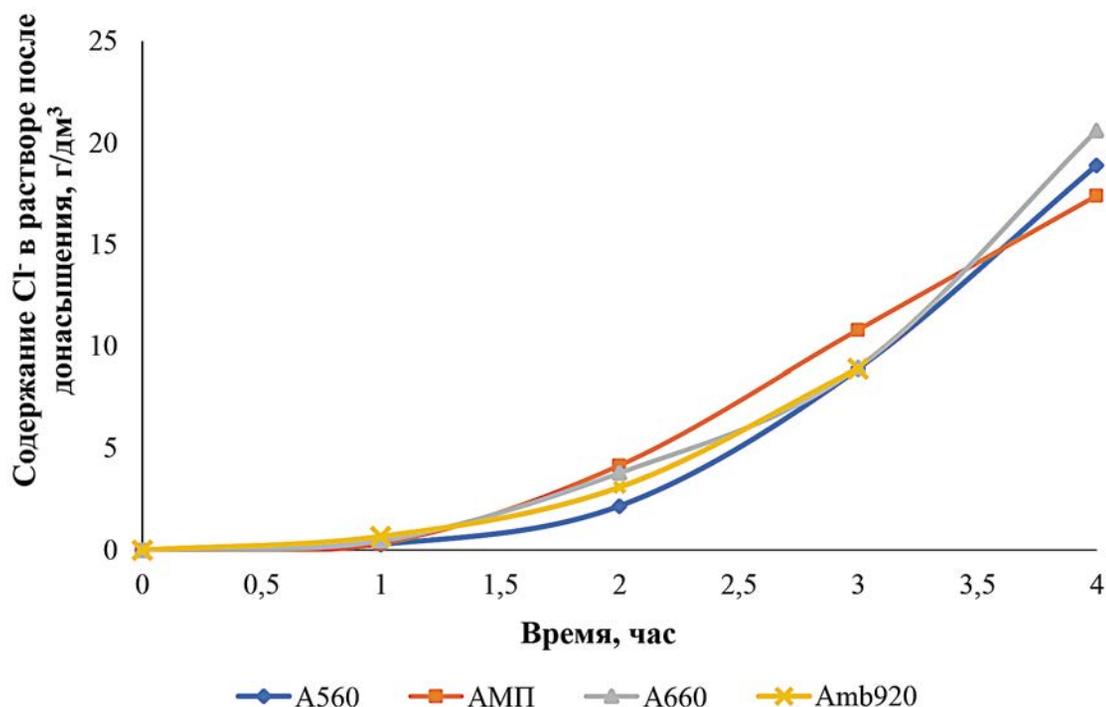


Рисунок 2. Выходные кривые десорбции хлорид-ионов при донасыщении анионитов ураном из модельного товарного десорбата

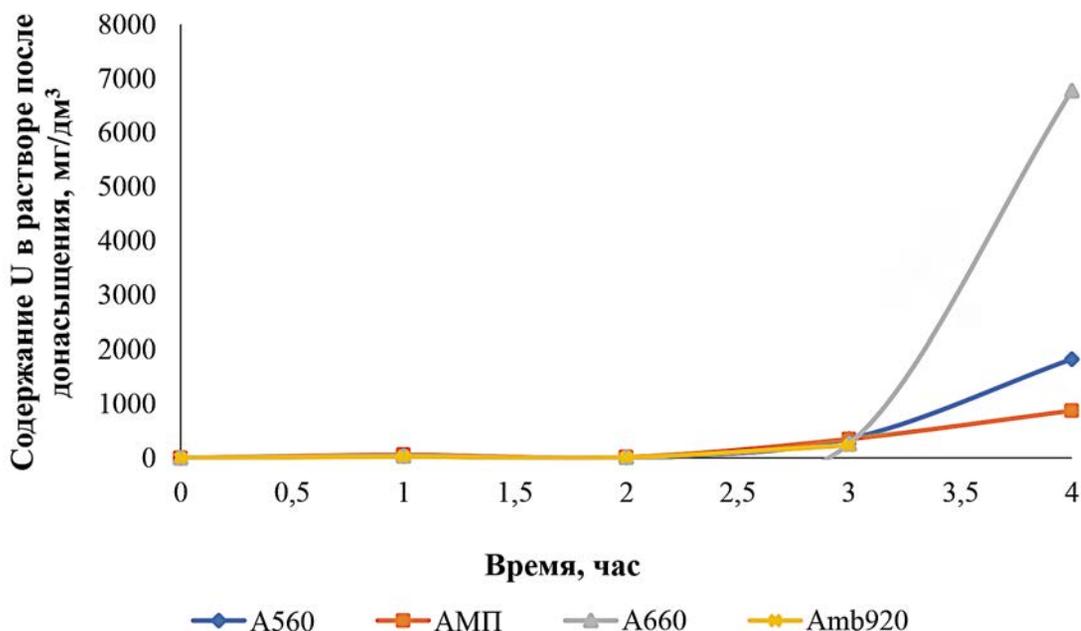


Рисунок 3. Выходные кривые сорбции урана при донасыщении анионитов ураном из модельного товарного десорбата

Хлорид-ионы эффективно вытесняются из анионитов при донасыщении, для удовлетворительной отмытки анионита от хлорид-ионов требуется не менее 2-х удельных объемов товарного десорбата, поступающего на донасыщение.

Десорбцию урана проводили в динамических условиях, десорбирующий раствор подавали в верхнюю часть колонны через неподвижный слой ионита с расходом 1 об/об донасыщенного сорбента в час. Состав десорбирующего раствора, г/дм³: 20 H₂SO₄, 100 NH₄NO₃. Выходные кривые десорбции урана представлены на рис. 4.

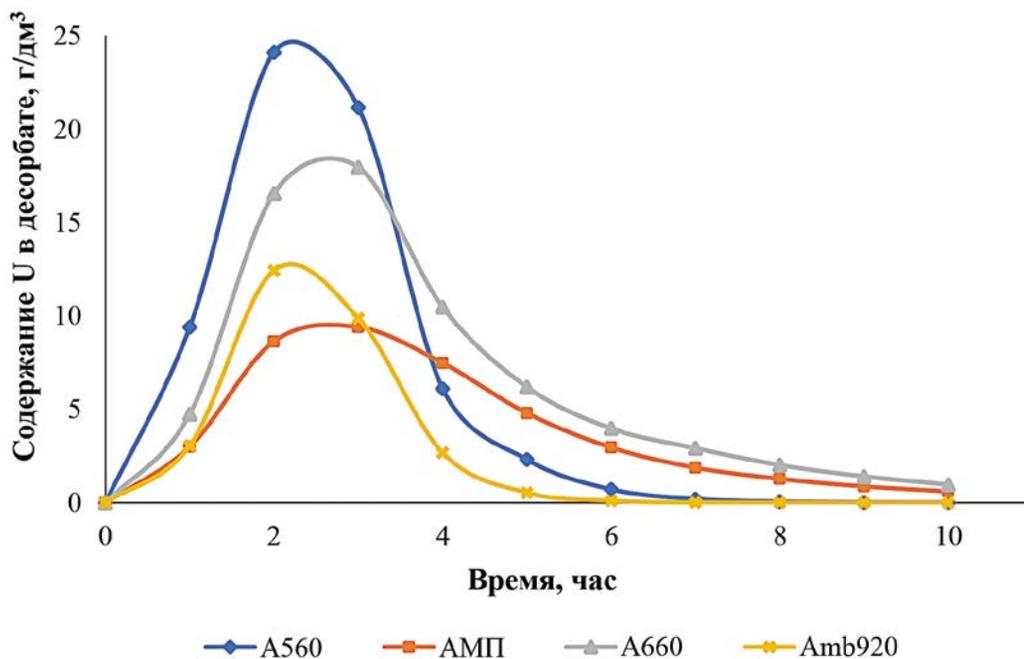


Рисунок 4. Выходные кривые десорбции урана

Данные по остаточному содержанию урана и анионов в ионитах после десорбции представлены в табл. 4.

По полученным данным определено необходимое соотношение потоков раствора и ионита на этапе донасыщения и десорбции.

Удельный объем минимально необходимого десорбирующего раствора и десорбата, выводимого на донасыщение анионита при выводе в товарный десорбат порядка $0,33 \text{ м}^3/\text{м}^3$ насыщенного анионита, представлен в табл. 5.

Отмывка анионитов от хлорид-ионов на стадии донасыщения прошла удовлетворительно при удельном объеме пропущенного раствора донасыщения порядка 2. Заметно хуже прошла отмывка при удельном объеме 1,5 (Ambersep 920U). Расчетное удельное

содержание хлорид-иона, перешедшего в десорбат, составляет $0,54 \text{ г}/\text{дм}^3$ анионита Purolite A560 и $0,98 \text{ г}/\text{дм}^3$ анионита АМП. То есть при выводе в товарный десорбат Purolite A560 $0,33 \text{ м}^3/\text{м}^3$ насыщенного анионита содержание хлоридов в нем должно составить $1,6 \text{ г}/\text{дм}^3$, АМП – $3,0 \text{ г}/\text{дм}^3$.

Как видно из представленных данных, наиболее эффективно десорбция урана осуществляется из пористых анионитов, причем пиридиниевый пористый анионит Purolite A560 практически не уступает по своим десорбционным характеристикам аниониту Ambersep 920U.

Для сорбции урана из продуктивных растворов подземного выщелачивания, содержащих $20\text{--}25 \text{ мг}/\text{дм}^3$ урана и $7,5 \text{ г}/\text{дм}^3$ хлорид-иона при $\text{pH}=1,5$, оптимальными являются пиридиниевые иониты нового поколения, например, Purolite A560 и A660, емкость которых по урану в этих условиях может составить

Таблица 4

Остаточное содержание урана и анионов в исследуемых анионитах

Анионит	Содержание в анионите, $\text{г}/\text{дм}^3$		
	U	NO_3^-	Cl^-
АМП	0,52	71,8	0,41
A560	<0,04	66,8	0,53
A660	0,10	81,0	0,65
Amba 920	<0,04	68,0	0,63

Таблица 5

Расчётные значения удельных объемов десорбирующего раствора и товарного десорбата, выводимого на донасыщение анионита при выводе в товарный десорбат порядка $0,33 \text{ м}^3/\text{м}^3$ насыщенного анионита

Анионит	$V_{\text{уд}} \text{ (ДР)}, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ насы-}$ щенного анионита	$V_{\text{уд}} \text{ (ТД) на донасыще-}$ $\text{ние, м}^3/\text{м}^3 \text{ насыщен-}$ ного анионита
A560	2,4	2,1
АМП	3,7	3,4
A660	2,9	2,6
Amb 920	2,1	1,8

12–15 $\text{г}/\text{дм}^3$. Десорбция урана из пористых анионитов Purolite A560 и Ambersep 920U проходит более эффективно по сравнению с гелевыми анионитами Purolite A660 и АМП.

Выводы: Проведены исследования сорбционного извлечения урана ионитами различной функциональности и структуры из сернокислых растворов с повышенным содержанием хлорид-ионов в статических и динамических условиях.

Оптимальным к применению в рассматриваемой системе с повышенным содержанием хлорид-ионов является пористый пиридиниевый анионит повышенной емкости, например, Purolite A560.

Для отработки технологии сорбционного извлечения урана из сернокислых растворов с повышенным содержанием хлорид-ионов на опытно-промышленной установке на месторождении Добровольное АО «Далур» планируется использовать пористый пиридиниевый анионит АМП-п, который является аналогом исследуемого в работе анионита Purolite A560.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Святецкий В.С., Полонянкина С.В., Ермаков А.Г. Уранодобывающая отрасль России: состояние и перспективы развития // Разведка и охрана недр. 2017. № 11. С. 22–26.
- 2) Машковцев Г.А., Мигута А.К., Щеточкин В.Н. Сырьевая база урана. Проблемы развития и освоения // Минеральные ресурсы России. 2017. № 3. С. 67–78.
- 3) Мешков Е.Ю., Соловьев А.А., Татарников А.В., Бобыренко Н.А. Сорбционная переработка продуктивных растворов скважинного подземного выщелачивания урана с повышенным содержанием хлорид-ионов // IX научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Молодежные решения для достижения лидерства атомной отрасли на мировом энергетическом уровне в эпоху трансформации экономики»: сборник тезисов. – Санкт-Петербург: СИНЭЛ, 2021. С. 42–45.
- 4) Рычков В.Н., Скрипченко С.Ю., Титова С.М., Наливайко К.А., Попонин Н.А. Сорбционная переработка хлоридсодержащих продуктивных растворов скважинного подземного выщелачивания урана // Сборник трудов IX международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы урановой промышленности». 7–9 ноября 2019 г., г. Алматы, Республика Казахстан. С. 262–268.
- 5) Милютин В.В., Некрасова Н.А., Харитонов О.В., Фирсова Л.А., Козлитин Е.А. Сорбционные технологии в современной прикладной радиохимии // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16. № 3. С. 313–322.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЪЕКТЫ ЛИТИЕВОГО ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

*Мухеева Е.Д. (mikheeva.ed@vims-geo.ru),
Кузьменко П.С. (kuzmenko@vims-geo.ru).
ФГБУ «ВИМС», Москва*

Актуальность изучения объектов гидроминерального сырья обусловлена несколькими факторами:

- **увеличение спроса на литий;**
- запрет ввоза дешевого карбоната лития из Аргентины, Чили и др. стран (кроме Боливии, Китая);
- отсутствие производства из собственного сырья (только вторичная переработка);
- находящиеся на стадии разведки месторождения пегматитов;
- медленное развитие технологий извлечения лития из ГМС;
- конкуренция с Китаем, который более 10 лет получает литий из соляных озер и в настоящее время активно изучает попутные воды газонефтяных месторождений.

Прогнозная оценка территорий, перспективных на выявление месторождений литиевого гидроминерального сырья (ГМС) на территории Российской Федерации, проводится с целью выделения площадей для проведения поисковых работ.

Гидроминеральные провинции структурно расположены в соляных толщах и повторяют распространение галогенных формаций, а также нефтегазовых провинций и проявлений серы газовой.

Как наиболее значимые, были выделены гидроминеральные провинции (ГМП) первого ранга – более крупные, и субпровинции второго ранга, отвечающие оценке прогнозных ресурсов лития категории P_3 в гидроминеральном сырье (табл. 1). Все гидроминеральные провинции по названию привязаны к географическим.

Таблица 1 – Гидроминеральные провинции России

Провинция (I ранг)	Субпровинция (II ранг)
Предкавказская	
Предуральская	Тимано–Печерская
	Средне–Уральская
	Южно–Уральская
Западно–Сибирская	
Восточно–Сибирская	Ангаро–Ленская
	Тунгусская
	Непская
	Якутская
	Хатангская
Камчатская	Паужетско–Кошелевская
	Эссовская
	Московская
	Архангельская
	Даурская
	Крымская

Полученная структурированная и проанализированная информация по объектам ГМС позволила выделить сначала крупные гидроминеральные провинции, а затем меньшие, вплоть до перспективных площадей.

За основу ранжирования перспективных площадей приняты промышленные и потенциально-промышленные типы гидроминерального сырья (табл. 2).

За рубежом к промышленному типу ГМС относятся салары, а на территории России к потенциально-промышленному – дренажные рассолы алмазоносных трубок и попутные подземные воды нефтегазоконденсатных месторождений.

По каждому потенциально-промышленному типу ГМС рассматривались схожие объекты в России.

Таблица 2

Промышленный и потенциально–промышленный типы ГМС [1]

Промышленный и потенциально–промышленный типы месторождений	Геохимический тип литиевого ГМС. Минерализация, г/л	Содержание Li, мг/л	Другие полезные ископаемые	Месторождения и площади (выделены разрабатываемые с извлечением лития)
Поверхностная и межкристальная рапа соляных озер	Сульфатный. SO ₄ Cl–Na, 220	до 1700	–	Сильвер–Пик (США)
	Хлоридный. Cl–Na, 400		К, В	Салары: Атакама (Чили), ОмбрэМуэрто (Аргентина), Уюни (Боливия); Озера: Цзабуе, Тайцзинайэр, Дунтай (Китай)
Дренажные рассолы алмазоносных трубок	Cl–Ca, 400	до 414	Br, Ca, Mg	Якутская алмазоносная провинция, трубка «Удачная»
Попутные подземные воды нефтегазоконденсатных месторождений	Br–Li рассолы. Cl–Na–Ca, Cl–Ca, 250–450	от 237 до 480	Sr, B, Br, Rb, Cs, хлориды Ca, Mg, Na, K	Нефтегазоносные провинции: Лено–Тунгусская (Ковыктинское, Знаменское), Непско–Ботубинская (Омолуйское, Верхнеленское).
	Br–Li рассолы. Cl–(Mg)–Ca–Na, 100–350	от 50 до 220 (единичные до 600)	Sr, B, Br, Rb, Cs, хлориды Ca, Mg, Na, K	Нефтегазоносные провинции: Прикаспийская (Ташлинская, Мустаевская, Иртекская пл.), Предкавказская (Тарумовская, Южно–Сухокумская, Берикейская пл.)

Таблица 3

Химический состав поверхностной рапы – оз. Эльтон

Элемент	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺	HCO ₃ [–]	Cl [–]	SO ₄ [–]	B	Sr	Rb	Br	Li	Cs
Содержание, мг/л	13158	4557	83799	100	3171	239307	33661	47	9,1	0,66	1915	7	0,68
Минерализация – 378 г/л, pH – 6,15, плотность – 1285 г/л													

Проанализированная информация по озерам Крыма, Волгоградской и Астраханской области, Хакасии, Тувы и Алтая, где проводились специализированные исследования на литий и другие микрокомпоненты, позволила сделать выводы о незначительных содержаниях:

- оз. Утинное, Шунет (Хакасия) – максимальное содержание лития в рапе достигает 5,4 мг/л при минерализации в 100 г/л. Установлено, что содержание лития неуклонно возрастает по мере роста общей минерализации, за исключением тех водоемов, где появляется избыточное количество карбонат- (CO_3) и гидрокарбонат (HCO_3) ионов;
- оз. Эльтон (Астраханская область) (табл. 3).

Анализ рапы соляных озер России по микросоставу, в том числе и наличию лития, геологическим условиям и перспективности использования – отдельное направление для исследований.

Дренажные рассолы алмазоносных трубок

Трубка «Удачная» находится в Республике Саха (Якутия). Осадочный чехол здесь представлен терригенно-карбонатными породами верхнего протерозоя и нижнего палеозоя, прорванными пермско-триасовыми долеритами и кимберлитами девон-карбонового возраста. Характерной особенностью геологического строения района является отсутствие мощных выдержанных пластов каменной соли, в которых зафиксировано большое количество разрывных нарушений и зон дробления осадочного чехла.

В гидрогеологическом плане трубка «Удачная» обводнена. Подземные воды представлены верхнекембрийскими хлоридно-кальциевыми рассолами с минерализацией до 140 г/л и среднекембрийским водоносным комплексом с минерализацией 300–380 г/л [2].

Апробированные прогнозные ресурсы лития кат. P_1 составляют 503 т/год с суммарным дебитом до 8600 м³/сут. при содержании лития от 164 мг/л. Химический состав вод, отобранных в 2023 году, представлен в табл. 4.

Развитая инфраструктура (действующие газонефтяные месторождения), доказанное наличие ГМС, хорошие содержания лития (от 200 до 574 мг/л) делают Восточно-Сибирскую гидроминеральную провинцию наиболее перспективной по добыче лития [3].

Наиболее значимые объекты Восточно-Сибирской ГМП:

- Талаканское, Северо-Даниловское, Даниловское, Верхнечонское, Ярактинское, Дулисьминское, Аянское, Ковыктинское месторождения;
- Хандинская, Знаменская, Балаганкинская, Балыхтинская, Рудовская, Тутурская, Коркинская, Сухо-Тунгусская, Ногинская площади. Литиеносность вод на этих участках повышенная и составляет более 200 мг/л.

Тарумовская площадь расположена в Республике Дагестан, хорошо изучена грави-, электро-, сейсморазведочными и тематическими поисковыми на литий работами масштаба вплоть до 1:50 000.

Осадочный чехол здесь представлен отложениями мезозойской группы (юры и мела), палеогеновой, неогеновой и четвертичной систем кайнозоя, залегающих на

Таблица 4

Химический состав вод Тарумовской площади

Минерализация, г/л	Содержание ценных микроэлементов, мг/л					
	K	Li	Cs	Rb	Sr	Br
175–200	4500	200 – 210	3–5	12–15	1000–1500	630–650

герцинском складчатом основании-фундаменте. Каменноугольные и триасовые отложения прослежены по данным сейсморазведки.

Скважины глубокого бурения вскрыли литиеносный водоносный комплекс в пределах площади точечно на глубине 5,5 км осадочного чехла, не доходя до фундамента.

Редкометальной специализацией (**Li**, Cs, Rb, Sr) обладает среднеюрский водоносный комплекс, который развит на всей территории Дагестана (от Дербента до Южно-Сухокумска).

Местами юрский водоносный горизонт переходит с понижением концентраций лития, выше по разрезу в нижнемеловой комплекс, но по составу вод (см. табл. 4) площадь представляет интерес для изучения и добычи лития.

Основные проблемы при освоении ГМС:

- 1) Отсутствие **промышленной** технологии извлечения лития из ГМС;
- 2) Отсутствие площадей с апробированными прогнозными ресурсами лития и попутных полезных компонентов (кроме пяти объектов в Якутии и Иркутской обл.);
- 3) Пересечение сферы интересов недропользователей (нефть-вода, газ-вода, алмазы-вода);
- 4) Отсутствие первичных данных по скважинам (паспортов, конструкций скважин и др.);
- 5) Нахождение ГМС в зонах аномально высокого пластового давления (АВПД) (трудности с извлечением, кольматаж ствола скважины, прерывистый режим откачки);
- 6) Отсутствие керна по всему разрезу глубоких скважин (высокая стоимость);
- 7) Захоронение отработанных вод.

Пути решения:

- 1) Финансирование и проведение технологических исследований на опытной площади и на разных видах подземных вод;
- 2) Проведение оценки и апробации прогнозных ресурсов ГМС на перспективных объектах;
- 3) Проведение и утверждение ТЭО объектов ГМС;
- 4) Координация сотрудничества между Роснедра и недропользователями по тематике ГМС;
- 5) Запуск программы «Региональное изучение гидроминерального сырья (ГМС) для извлечения лития и попутных полезных компонентов, а также создание централизованной цифровой базы данных и карты Российской Федерации».
- 6) Проведение мониторинга во времени дебитов и химического состава вод на скважинах по перспективным площадям (от пяти лет).

Выводы:

- 1) В России имеются площади и скважины с потенциально промышленными содержаниями лития (до 500 мг/л), но продуктивное ГМС находится на глубине более 1500 м.
- 2) Отечественное ГМС – комплексное сырье, из которого возможно попутно получать Sr, B, Br, Rb, Cs, хлориды Ca, Mg, Na, K.
- 3) Установлена пространственная связь месторождений нефти и газа с объектами ГМС, что необходимо учитывать при проведении прогнозно-поисковых работ на нефть и газ.

- 4) ГМС является условно неисчерпаемым источником полезных ископаемых (в течение 30–40 лет осуществляется фактический приток вод с постоянными содержаниями лития и попутных компонентов в ГМС).

Дальнейшие исследования гидроминерального сырья безусловно важны и необходимы. Оценка прогнозных ресурсов ГМС категории P_3 и выделение площадей с ресурсами категории P_2 на всей территории Российской Федерации – наиболее первостепенная и значимая задача.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Требования к качеству минерального сырья, содержащего редкие и редкоземельные металлы. Литий. Михеева Е.Д., Комин М.Ф., Торикова М.В. Научная редакция Быховского Л.З. Редактор Спорыхина Л.В. // Методические рекомендации № 121. – М., 2016.
- 2) Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Гладков А.С., Трифонов Н.С., Серебряков Е.В., Павлов С.С., Ильин А.В. Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1235–1253. DOI: 10.5800/GT–2018–9–4–0393.
- 3) Кузьменко П.С., Чмерев В.С., Михеева Е.Д. Условия формирования и закономерности размещения литиеносных рассолов на территории РФ. РиОН, 2023. № 07. С. 33–46. DOI: 10.53085/0034–026X_2023_07_33.

СТРАТЕГИЧЕСКИЕ МЕТАЛЛЫ (ВЕ, НВ, ТА, ЛИ) МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОЛЬСКОГО РЕДКОМЕТАЛЛЬНОГО ПОЯСА (АРКТИЧЕСКАЯ ЗОНА, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ, РОССИЯ)

*Морозова Л. Н. – 1,2, Зозуля Д.Р. – 2, Скублов С.Г. – 3
1 – ФГБУ «ВИМС», Москва, 2 – ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты,
3 – ИГГД РАН, Санкт-Петербург*

Кольский редкометалльный пегматитовый пояс Арктической зоны северо-восточной части Фенноскандинавского щита (Кольский полуостров, Россия) протягивается от Западных Кейв к северо-западу до границы с Норвегией и имеет длину более 600 км [4]. Объектами исследований являются месторождения гранитных редкометалльных пегматитов: Колмозерское, Полмостундровское, Охмыльк, Васин-Мыльк и Шонгуйское, Плоскогорское и Западнокейвская группа рудопроявлений щелочногранитных пегматитов, расположенные в Кольском редкометалльном пегматитовом поясе. Изучение этих пегматитов началось в 40–60 гг. XX века такими известными учеными, как Н.А. Солодов, В.В. Гордиенко, А.И. Гинзбург, А.Ф. Соседко, А.Б. Наливкин, А.В. Сидоренко, А.М. Заседателев и др. Все месторождения относятся к резервным балансовым месторождениям с подсчитанными и утвержденными запасами полезных компонентов (Ве, Nb, Та, Cs, Li) в ГКЗ. В 2023 г. госкорпорация «Росатом» и ПАО «ГМК Норильский никель» получили лицензию на разработку Колмозерского месторождения, а предприятие «Арктический литий» – на разработку Полмостундровского месторождения.

Литий. Важнейшими промышленными минералами лития в месторождениях Кольского редкометалльного пегматитового пояса являются сподумен – $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$, цепочечный силикат группы пироксенов, и лепидолит – $\text{KLi}_2\text{Al}(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$, группа слюд. Сподумен – главный минерал лития и породообразующий минерал пегматитов Колмозерского и Полмостундровского месторождений. В Шонгуйском месторождении

сподумен является второстепенным минералом. На месторождениях Васин-Мыльк и Охмыльк главные минералы лития – сподумен и лепидолит, которые также являются и породообразующими минералами пегматитов.

На Колмозерском месторождении [3] основные разновидности литиевых руд представлены сподуменовыми, сподумен-полевошпатовыми и кварц-сподуменовыми пегматитами с преобладанием первых. Содержание сподумена в колмозерской руде в среднем составляет 20 % при содержании оксида лития в руде 1,13 мас. % [2, 6]. Колмозерский сподумен на сегодняшний день наиболее изучен современными методами исследования и представлен тремя генерациями: сподумен-I, сподумен-II и сподумен-III [5, 8]. Среднее содержание Li_2O в колмозерском сподумене составляет 7,44 мас. % [5]. Минерал сравнительно равномерно распределен по простиранию, падению и мощности рудных тел. Сподумен непрозрачный, редко полупрозрачный, серовато-зеленого цвета, редко зеленого или с розовым оттенком цвета. Кристаллы коротко- (длина 0,5–10 мм), средне- (1–10 см) и длиннопризматического (10 см – 1,5 м) габитуса. Минерал разбит поперечными трещинами отдельности, реже продольными трещинами, выполненными кварцем, альбитом и мусковитом. По трещинам отмечается смещение отдельных частей минерала относительно друг друга. Микроскопическими исследованиями выявлена неоднородность кристаллов сподумена-I и сподумена-II, представленная двумя типами – фазовой и внутрифазовой. К фазовой (минеральной) неоднородности относятся многочисленные включения, среди которых диагностированы: альбит, кварц, мусковит (наиболее часто встречаемые), минералы группы колумбита, апатит, гранат и касситерит. Внутрифазовая неоднородность в сподумене проявлена наличием темно- и светло-серых зон (участков) различной конфигурации, различающихся по химическому составу. Светло-серые зоны отличаются от темно-серых более высокой величиной отношения $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MnO}$ (10,75–17,57 и 4,63–9,80 соответственно) [5]. Помимо Li, Al и Si, колмозерские сподумены содержат второстепенные элементы, среди которых преобладают Fe, Mn и Na при доминировании Fe. Высокое содержание Fe в колмозерских сподуменах связано с тем, что Fe^{3+} замещает Al в кристаллической решетке сподумена, а Li в небольшом количестве изоморфно замещается Fe^{2+} , Mn и Na [8]. Изучение кристаллофлюидных включений в сподумене-II показало, что минеральные фазы в кристаллофлюидных включениях содержат: забуелит, кристобалит, кальцит и слюду. Забуелит и кристобалит ранее в колмозерских пегматитах не отмечались и интерпретируются как продукты реакции между захваченным флюидом и сподуменом-II. Предполагается, что исходный флюид, существовавший при кристаллизации сподумена-II (+ кварц), состоял из $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 +$ растворенные щелочные карбонаты [8].

На Полмостундровском месторождении литиевые руды представлены сподуменовыми, сподумен-полевошпатовыми и кварц-сподуменовыми пегматитами с преобладанием последних. Содержание сподумена в полмостундровской руде в среднем составляет 20 % при содержании оксида лития в руде 1,25 мас. % [2, 6]. Среднее содержание Li_2O в полмостундровском сподумене составляет 6,26 мас. %. На примере полмостундровского сподумена были изучены процессы изменения минерала, связанные с его замещением кварцем, альбитом, мусковитом, калиевым полевым шпатом и глинистыми минералами. Сподумен весьма легко подвергается различным процессам изменения, которые приводят к выносу из него лития и формированию псевдоморфоз различных минералов.

Месторождения Охмыльк и Васин-Мыльк характеризуются зональным строением. Содержание оксида лития в пегматитах месторождения Васин-Мыльк в среднем составляет 1,03 мас. % [2]. Сподумен и лепидолит развиты в центральных частях даек

и слагают сподумен-кварц-альбитовый пегматит и лепидолит-поллуцит-сподумен-альбитовый пегматит. Содержание оксида лития в сподумен-кварц-альбитовом пегматите составляет 1,55 мас. %, а в лепидолит-поллуцит-сподумен-альбитовом пегматите — 1,10 мас. %. Содержание сподумена в руде месторождения Васин-Мыльк в среднем варьирует от 15 до 20 %. [6]. Среднее содержание оксида лития в сподумене составляет 5,42 мас. %.

Содержание оксида лития в пегматитах месторождения Охмыльк в среднем составляет 0,33 мас. % [2, 6]. Сподумен и лепидолит в качестве второстепенных минералов отмечаются в промежуточной и центральной частях пегматитовых даек.

Ниобий и тантал рассматриваются как экономически важные попутные рудные компоненты в месторождениях Колмозерское, Полмостундровское, Шонгуй, Охмыльк и Васин-Мыльк. Основной рудный минерал представлен группой колумбита. Минералы распространены равномерно, имеют пластинчатый, таблитчатый и короткостолбчатый габитус, цвет минералов — черный. Размеры минералов — от 1 до 70 мм в длину и от 0,1 до 10 мм в толщину. В наиболее дифференцированных пегматитах (например, из месторождений Колмозерское и Полмостундровское) минералы группы колумбита демонстрируют широкие вариации составов по двум трендам: от колумбита-(Fe) к танталиту-(Fe) и от колумбита-(Fe) к колумбиту-(Mn) (\neq танталит-(Mn)). При этом соотношения Ta/(Ta + Nb) и Mn/(Mn + Fe) в этих минералах варьируют в пределах 0,1–0,8 и 0,1–0,63 соответственно. В этих же пегматитах в значительном количестве может присутствовать Ta разновидность пирохлора — микролит, который характеризуется наиболее высокими содержаниями Ta для Nb-Ta оксидов из данной группы пегматитов (Ta/(Ta + Nb) = 0,94–0,97).

Селективно Nb оксид — фергусонит-(Y) — является характерным минералом пегматитовых рудопоявлений Западнокейвской группы (несколько десятков неправильной формы, иногда жильных, тел (до 1–40 м²) в эндо- и экзоконтактах апикальных частей массивов щелочных гранитов). В некоторых пространственно связанных с пегматитами кварцолитовых телах содержание Nb₂O₅ достигает 2 вес. % при отношении Nb/Ta=15–20. Минерал характеризуется градиентным составом с повышением к краям HREE/Y отношений [10]. Фергусонит-(Y) ассоциирует с цирконом и силикатами и карбонатами Y и HREE (фторбритолит-(Y), иттриалит-(Y), гадолинит-(Y), кайнозит-(Y), тенгерит-(Y)) [10].

Особый интерес представляет уникальное пегматитовое тело амазонит-кварц-альбитового состава (Плоскогорское месторождение) в Западных Кейвах. Оно имеет несколько сотен метров в длину и несколько десятков метров в ширину. Богатая и разнообразная редкометалльная (Ta-Y-HREE (\neq Nb, Be, Li)) минерализация представлена, главным образом, микролитом и иттрофлюоритом, а также второстепенными и акцессорными бетафитом, воджинитом, колумбитом-(Fe), колумбитом-(Mn), кеноплюмбомикролитом, пирохлором, кеноплюмбопирохлором, фергусонитом-(Y), форманитом-(Y), кейвиитом-(Y,Yb), ксенотимом-(Y,Yb), монацитом-(Ce), бритолитом-(Y), таленитом-(Y), гадолинитом-(Y), хингганитом-(Y,Yb), даналитом, гентгельвином, полили-тионитом, кайнозитом-(Y) и другими минералами [1].

Бериллий. Бериллий в месторождениях Колмозерское, Полмостундровское, Охмыльк и Васин-Мыльк является попутным рудным компонентом. Месторождение Шонгуйское содержит рудоразборный берилл, представляющий промышленный интерес.

Берилл из Шонгуйского месторождения отмечается в промежуточной и центральной зонах бериллсодержащих даек. Промежуточная зона сложена кварц-альбит-микроклиновым, кварц-микроклиновым и кварц-клевеландитовым агрегатами с

блоковым микроклином. Центральная зона состоит из кварцевого ядра. Химический состав берилла месторождения Шонгуй уникален. Суммарное содержание Li, Cs, K, Rb и Na в берилле составляет 25300 ppm. Содержание Li, Ce и Na составляет 4430, 5000 и 15400 ppm соответственно. Берилл Шонгуйского месторождения относится к Li-Cs-Na типу, который не выделялся ранее в существующих классификациях. Предполагается, что этот берилл кристаллизовался в основном на магматической стадии, а не на гидротермальной и метасоматической [9]. По данным [7], берилл месторождения Шонгуй обеднен Ti, V и Cr и кристаллизовался при высоких температурах (415–460 °C) вместе с полевым шпатом, мусковитом, гранатом и турмалином (плагиоклаз-щелочно-полевошпатовые, мусковит-полевошпатовые и гранат-турмалиновые геотермометры).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ. Грант № 22-17-20002, <https://rscf.ru/project/22-17-20002/>

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Волошин А.В., Пахомовский Я.А. Минералы и эволюция минералообразования в амазонитовых пегматитах Кольского полуострова. Л.: Наука, 1986. 168 с.
- 2) Коровкин В.А. и др. Недрa Северо-запада Российской Федерации. Санкт-Петербург. Изд-во ВСЕГЕИ. 2003. 754 с.
- 3) Морозова Л.Н. Колмозерское литиевое месторождение редкометалльных пегматитов: новые данные по редкоэлементному составу (Кольский полуостров). Литосфера. 2018. Т. 18. № 1. 18(1) С. 82–98. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-1-082-098.
- 4) Морозова Л.Н., Серов П.А., Кунаккузин Е.Л. и др. Кольский редкометалльный пегматитовый пояс: основные черты геологического строения. Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. 17, 374–378. <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.071>.
- 5) Морозова Л.Н., Базай А.В. Сподумен из редкометалльных пегматитов Колмозерского литиевого месторождения (Кольский полуостров) // Записки Российского минералогического общества. 2019. Т. 148. № 1. С. 65–78. doi: 10.30695/zrmo/2019.1481.06.
- 6) Мультимедийный справочник по минерально-сырьевым ресурсам и горнопромышленному комплексу Мурманской области: цифровой информационный ресурс (под ред. Ф.П. Митрофанова, А.В. Лебедева). Апатиты. Изд-во: ГИ КНЦ РАН. 2001.
- 7) Пономарева Н.И., Гордиенко В.В., Шурекова Н.С. Физико-химические условия формирования берилла в месторождении «Большой лапоть» (Кольский полуостров) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Вып. 3. С. 4–20.
- 8) Morozova L.N., Sokolova E.N., Smirnov S.Z., Balagansky V.V., Bazai A.V. Spodumene from rare-metal pegmatites of the Kolmozero lithium world-class deposit on the Fennoscandian shield: trace elements and crystal-rich fluid inclusions // Mineralogical Magazine. 2021. V. 85 (2). № 557. p.p. 149–160.
- 9) Morozova L.N., Skublov S.G., Zozulya D.R., Serov P.A., Borisenko E.S., Solovjova A.N., Gavrilchik A.K. Li-Cs-Na-rich beryl from beryl-bearing pegmatite dike no. 7 of the ShOngui deposit, Kola province, Russia // Geosciences, 2023, 13, 309 <https://doi.org/10.3390/geosciences13100309>.
- 10) Zozulya D., Macdonald R., Bagiński B. REE fractionation during crystallization and alteration of fergusonite-(Y) from Zr-REE-Nb-rich late- to post-magmatic products of the Keivy alkali granite complex, NW Russia. Ore Geology Reviews, Volume 125, October 2020, 103693.

ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМ СЫРЬЁМ ПРОГРАММЫ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ МАГНИТОВ В РФ

Нечаев А.В., Поляков Е.Г.
АО «ГК «Русредмет», Санкт-Петербург

Области и объём использования высококоэрцитивных магнитов типа FeNdB и SmCo постоянно расширяются, что существенно и быстро изменяет масштаб потребления РЗМ в целом (рис. 1).

На протяжении последних шести лет произошёл двукратный рост объёма потребления этой небольшой «магнитной» группы металлов (Pr, Nd, Sm, Tb, Dy) и сегодня их доля на рынке РЗЭ – более 42 % по объёму и 93 % по стоимости. Благодаря рекордным характеристикам магнитов на их основе они используются в большинстве высокотехнологичных сфер, включая энергетику, электромобильность, компьютерную и робототехнику и современные системы вооружения, где по степени критичности Dy, Sm и Nd занимают три первых места в ряду используемых материалов [2].

Анализ наблюдаемого роста потребления «магнитных» РЗЭ [3] вызывает тревогу промышленности относительно перспектив снабжения ими:

- рынок «магнитных» РЗМ утроится к 2035 г. В предположении среднегодового роста потребления в 8,3 % ожидается темп роста цен в тот же период в интервале 3,2–3,7 %;
- годовой дефицит NdFeB магнитов в 2035 г. прогнозируется в размере 206 000 т;
- среднегодовой дефицит оксидов Nd и Pr в 2035 г. ожидается в размере 68 000 т;
- диспрозий уже дефицитен с конца прошлой декады.

В реальной перспективе ситуация вряд ли изменится по причине существующей структуры мировых запасов РЗЭ, где очевидно преобладание лёгкой группы редкоземельного ряда. Подтверждением этому – положение с производственными квотами в Китае. Так, при общем увеличении производственных квот по РЗЭ в текущем году на 14 % в сравнении с предыдущим, квоты на производство средне-тяжёлых уже в течение 6 лет остаются неизменными, что свидетельствует об их явной ограниченности [4].

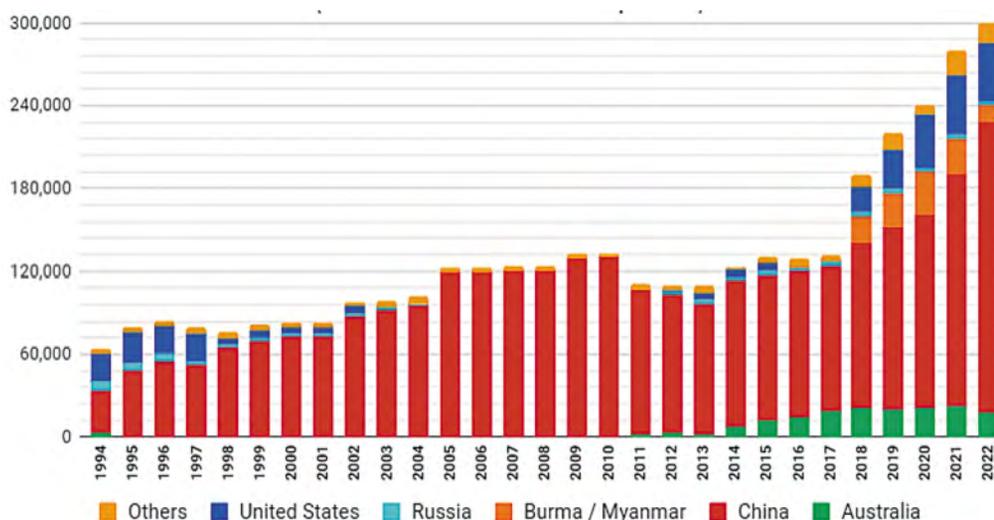


Рисунок 1. Мировое потребление редкоземельной продукции в пересчёте на оксиды, т/г [1]

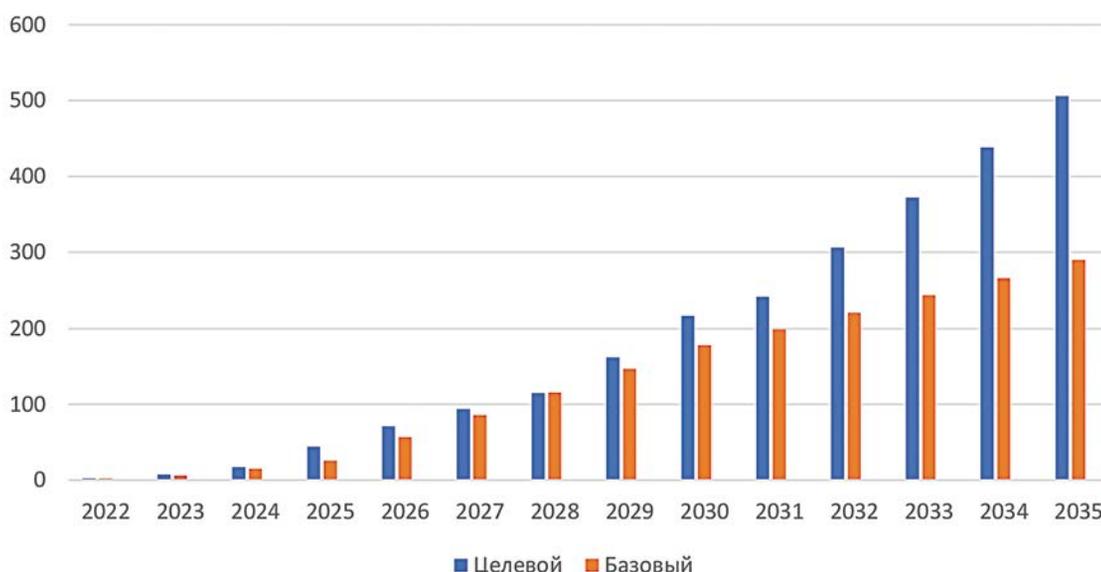
Таблица 1 – Типы используемых NdFeB магнитов [5]

Тип	Макс. раб. T, °C	Содерж. Dy, масс. %	Содерж. Nd+Pr, масс. %	Область применения
6/н	80	<0,5	29,5	Игры, игрушки и пр.
М	100	1,4	28,6	Дисководы, CD/DVD, МРТ, бытовая техника и пр.
Н	120	2,8	27,2	Магнитные сепараторы, измерительные приборы, гистерезисные муфты и пр.
SH	150	4,2	25,8	Ветрогенераторы, электровелосипеды, промышл. моторы, вспомогат. моторы автомобилей
UH	180	6,5	24,5	Промышл. генераторы, оконечн. приёмные устройства
EHZ/АН	200/220	8,5–11	19–21,5	Тяговые двигатели автомобилей, высокотемпературные моторы и генераторы

Среди причин – истощение собственной ресурсной базы средне-тяжёлых РЗЭ и проблемы с поставками их из Мьянмы.

Здесь мы ограничимся рассмотрением только магнитов системы NdFeB, поскольку самарий-кобальтовые постоянные магниты занимают менее 5 % этого рынка. Расширение верхнего температурного предела, требующееся для интенсивных условий эксплуатации оборудования, достигается добавками в состав неодимовых магнитов Dy, реже Tb. Типы магнитов системы NdFeB, их составы и области применения представлены в табл. 1.

Во всём мире наблюдается устойчивый рост использования возобновляемых источников энергии и производства разнообразного электрического транспорта. С заметным отставанием этот процесс идёт и в РФ, где реализуется программа развития ветрогенерации и Стратегия развития автомобильной промышленности. В соответствии с ними в ближайшее десятилетие планируется ввод в строй 500–600 МВт/год новых ветрогенераторов [6] и рассматриваются два сценария развития производства электромобилей (рис. 2).

Сценарии производства электромобилей в РФ, тыс шт/г**Рисунок 2.** Запланированное Стратегией производство средств электрического автотранспорта, тыс. шт./год

Принимая в расчётах среднюю цифру вводимой мощности 550 МВт/г, магниты типа SH, массу магнита равной 650 кг/МВт и 30 %-ное содержание РЗМ в магните, получаем ежегодную потребность в них на нужды ветроэнергетики, равную 107 250 кг. Переход к отдельным металлам и округление даёт 15 т/г Dy и 92 т/г Nd+Pr, т. е. 74 т/г Nd и 18 т/г Pr.

В расчётах потребностей автомобилестроителей будем опираться на цифры, заложенные в низший (базовый) сценарий Стратегии, и примем следующие условия:

- упростив задачу, сведём к двум категории автомобилей – легковые и грузовые, включая электробусы;
- ещё более упрощая, примем соотношение между легковым и грузовым автотранспортом как 1:1,5 в 2023–2028 гг. и 1:1 в 2029–2035 гг.;
- в соответствии с мировыми тенденциями принимаем в объёме электротранспорта долю выпуска машин с постоянными магнитами NdFeB равной 90 %;
- удельная масса магнитов – 2–3 (принимаем 2,5) кг/легковое авто и 15 кг/грузовое;
- закладываем в расчёт магниты типа N38UH-N48UH – 31 % РЗМ (24,5 % Nd+Pr и 6,5 % Dy), хотя для этого применения рекомендуются даже более богатые диспрозием типы EH_z и AH (19–21,5 % Nd+Pr и 8,5–11 % Dy), обеспечивающие работоспособность в более жёстких температурных режимах.

Результаты проведённых расчётов иллюстрирует рис. 3.

Учитывая потери в полном технологическом цикле производства магнитов (извлечение от рудного концентрата до металла – 90–95 %, от металла до готового магнита – 55–82 % [5]), получаем величину сквозного извлечения не выше 78 %. Для последующих расчётов примем сквозное извлечение от концентрата до магнита равным 75 %, хотя в реальности оно может быть заметно ниже. Это подчёркивает необходимость создания параллельно с производством магнитов системы сбора и переработки отходов на всех стадиях длинной технологической цепи. Отдельный вопрос – возврат в производственный цикл магнитов не только с выработавших ресурс ветрогенераторов, но и

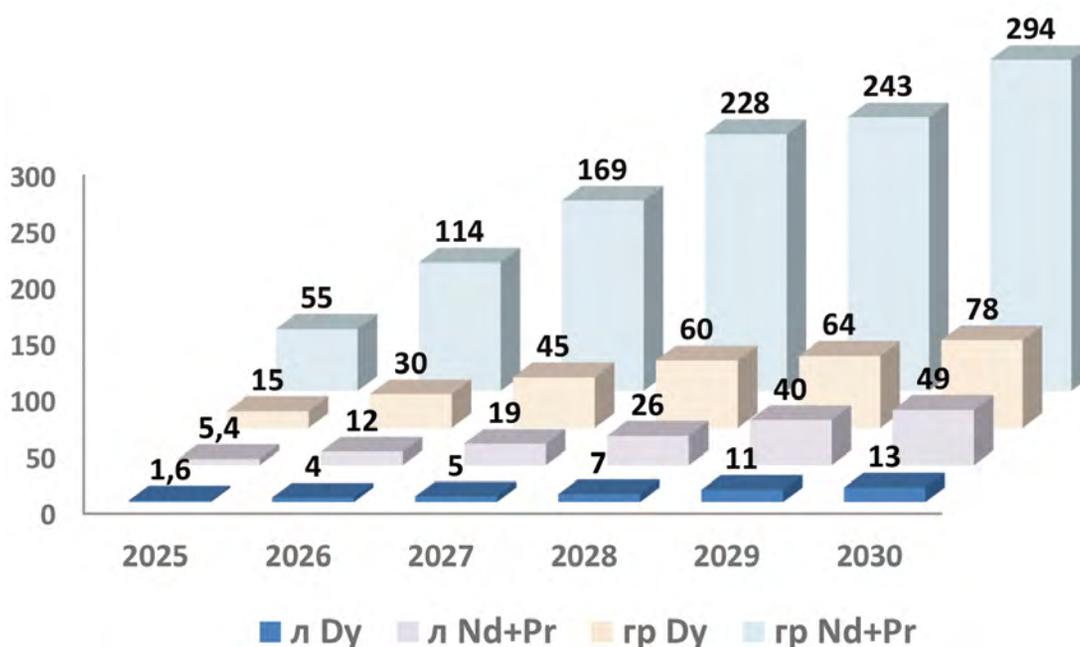


Рисунок 3. Количество отдельных РЗМ, необходимых для производства легковых (л) и грузовых (гр) машин согласно Стратегии, т/г

с тяговых моторов разнообразного транспорта, промышленных электродвигателей и других устройств.

Общая и отдельно по электромобилям и ветрогенераторам потребности в «магнитных» РЗМ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Потребность в РЗМ для производства магнитов NdFeB в рамках программ развития ветроэнергетики и электромобильности

Период, г	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Электромобильность						
M_{Nd+Pr} , Т	60	126	188	254	283	343
M_{Dy} , Т	17	34	50	67	75	91
Ветрогенерация						
M_{Nd+Pr} , Т	92	92	92	92	92	92
M_{Dy} , Т	15	15	15	15	15	15
Суммарно						
M_{Nd+Pr} , Т	152	218	280	346	375	435
M_{Dy} , Т	32	49	65	82	90	106
С учётом сквозного извлечения 75%						
M_{Nd+Pr} , Т	203	291	373	461	500	580
M_{Dy} , Т	43	65	87	109	120	141

Таблица 3

Количество «магнитных» РЗМ из разных реальных источников, т/г (согласно Дорожной карте)

	$NdPr_2O_3$	Dy_2O_3	Nd+Pr	Dy
2023	8,7	0,37	7,4	0,32
2024–2025	87	3,7	74	3,2
2026–2028	962	37	818	32
2029–2030	1623	38	1380	33

Планы воссоздания производства редкоземельной продукции в стране отражены в Дорожной карте развития высокотехнологической области «Технологии новых материалов и веществ» в части продуктового направления «Редкие и редкоземельные материалы».

Наращение объёма производства «магнитных» РЗМ с пересчётом оксидов на металлы представлено в табл. 3.

Здесь учтены перспективы Соликамского магниевого завода в части лопарита и планы «Скайграда», а также Росатома по переработке фосфогипса.

Баланс потребностей в РЗМ и возможностей их производства для целей ветрогенерации и электромобильности представлен в табл. 4.

Таблица 4

Баланс потребностей и возможностей в рамках проектов развития ветрогенерации и электромобильности

Период		2025	2026	2027	2028	2029	2030
Потребность	M_{Nd+Pr} , Т	203	291	373	461	500	580
	M_{Dy} , Т	43	65	87	109	120	141
Возможности	M_{Nd+Pr} , Т	74	962	962	962	1623	1623
	M_{Dy} , Т	3,2	32	32	32	33	33
Баланс	M_{Nd+Pr} , Т	-129	+671	+589	+501	+1123	+1043
	M_{Dy} , Т	-40	-33	-55	-77	-87	-108

В случае осуществления намеченных планов, начиная с 2026 г. можно ожидать устойчивый избыток неодима и празеодима, который будет использован в других отраслях или поставлен на рынок. В то же время с первого года производства количество выпускаемого диспрозия окажется недостаточным и дефицит будет уверенно нарастать. Следует отметить, что в расчётах рассмотрены только две области использования FeNdВ магнитов. Учёт таких быстрорастущих секторов, как промышленные электродвигатели, роботы, дроны, существенно ухудшит положение.

Впрочем, гарантии осуществления этих планов нет и в части неодима. Кроме того, в Дорожной карте не предусмотрено создание собственного производства металлических РЗМ. Эта позиция отсутствует и в перечне ограничений по использованию импортных комплектующих. Вероятно, предполагается их поставка из-за рубежа, что и до введения санкций представляло собой непростую задачу ввиду напряжённой ситуации на мировом рынке редкоземельной продукции.

Заключение

Расчёты, сделанные в настоящей работе, безусловно носят оценочный характер. Тем не менее, они определённо показывают несоответствие планов развития ветрогенерации и электромобильности в стране с возможностью обеспечения их сырьём согласно Дорожной карте и отсутствие координации в цепи планирования новых производств.

Увеличение объёмов переработки лопарита и фосфогипса даст незначительный прирост «магнитных» РЗМ, но вызовет перепроизводство избыточного на мировом рынке церия и повысит себестоимость остальных членов редкоземельного ряда.

Необходимо спешить с созданием на основе имевшегося в стране опыта и новых знаний полной собственной цепи производств от сырья до магнитов и другой высокотехнологичной продукции, отдав безусловные приоритеты природному и техногенному сырью и полупродуктам действующих производств с высокой долей магнитных РЗЭ – эвдиалиту и производным от переработки хибинского апатита (составляющим ежегодно до 50 % мирового производства РЗЭ), о чём мы говорили на первой и второй подобных конференциях.

Ориентация на регулярные поставки редкоземельной продукции из Китая при росте наших потребностей и в условиях дефицитного рынка и санкционного давления ненадёжна и опасна, поскольку сохраняет зависимость от импорта и не даёт шанса созданию собственных вертикально интегрированных высокотехнологичных производств.

В то же время, обладая востребованным на мировом рынке продуктом, мы принципиально изменяем там свою позицию в части доступа к необходимым передовым технологиям.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) URL: <https://geology.com/articles/rare-earth-elements/> (Дата обращения 11.05.2023)
- 2) Bobba S., Carrara S., Huisman J. et al. Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. *A Foresight Study*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2020. 98 p.
- 3) Rare Earth Magnet Market Outlook to 2035. Adamas Intelligence. Apr. 20, 2022. 229 p.
- 4) URL: <https://www.adamasintel.com/china-ups-2023-rare-earth-quota/> (Дата обращения 09.11.2023)
- 5) Smith B. J., Riddle M. E., Earlam M. R. et al. Rare Earth Permanent Magnets. Supply Chain Deep Dive Assessment / U.S. Department of Energy. 2022. 82 p.
- 6) Рынок возобновляемой энергетики России: текущий статус и перспективы развития / Информационный бюллетень АРВЭ. Июль 2022. 69 с.

ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ ПО ДОБЫЧЕ И ИЗВЛЕЧЕНИЮ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СПВ УРАНА

Руденко А.А. – 1, Носырев Г.М. – 1, Трошкина И.Д. – 2, Данилейко В.В. – 1,
Бардыш А.В. – 2, Ванин И.А. – 2
1 – АО «РУСБУРМАШ», Москва, Россия
2 – РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

В течение 2017–2023 гг. в АО «РУСБУРМАШ», ООО АРМЗ-Сервис совместно с РХТУ им. Д.И. Менделеева разработана технология извлечения попутных компонентов при скважинном подземном выщелачивании урана. Технология запатентована и включает селективно-опережающее извлечение полезных компонентов, мобильную сорбционную установку и целевые сорбенты.

Предпосылки

АО «Далур»

Рений-редкоземельно-урановое месторождение Добровольное выявлено в 1986 г. Госбалансом учтены: 339,0 т урана по категории C_1 , 7060,0 т урана по категории C_2 , 5656 т урана по категории P_1 . Глубина залегания урановых руд составляет 480–700 м. Средние содержания урана по залежам 0,028–0,057 %. Ресурсы и запасы рения составляют: P_1 – 5,59 т и C_2 – 10,6 т. В настоящее время готовится отчет с подсчетом запасов по результатам детальной разведки месторождения.

Содержание рения в рудах по классам составляет: от 0,01 до 1 г/т – 71 %, от 1 до 10 г/т – 29 %. Высокие содержания рения приурочены к подзонам бедных «серых» урановых руд и их «богатым» подзонам, 15–20 % рениевых руд локализованы в подзоне «белесых» пород. Рений, кроме собственной минеральной формы (сульфиды рения), установлен в виде сорбционной примеси в настуране, пирите, марказите и глинистом веществе [1].

Кроме рения и урана, в рудах месторождения присутствуют молибден и иттрий (рис. 1).

АО «Хиагда»

Продуктивные растворы, образующиеся при добыче урана на месторождениях Хиагдинского рудного поля (ХРП), наиболее богаты по содержанию РЗМ по сравнению с их содержанием в продуктивных растворах при отработке месторождений Далматовское (Россия), Семизбай, Буденовское, Заречное (Казахстан), Мейлисай, Северный Кенимех (Узбекистан). Поэтому урановые месторождения ХРП – наиболее привлекательные объекты для попутного с ураном извлечения РЗМ из ПР [6]. Содержания урана и РЗМ в проницаемых рудоносных отложениях месторождений ХРП приведены в табл. 1.

Результаты опробования продуктивных растворов из скважин блоков В1.19 и В1.20 на U и РЗМ приведены в табл. 2.

Технические решения

Способ добычи полезных ископаемых подземным выщелачиванием

Способ включает сооружение сети технологических скважин, закачку выщелачивающих растворов и откачку продуктивных растворов, переработку растворов сорбцией/десорбцией и получение готовых продуктов, причем откачку продуктивных растворов с сопутствующими компонентами осуществляют дифференцировано из скважин,

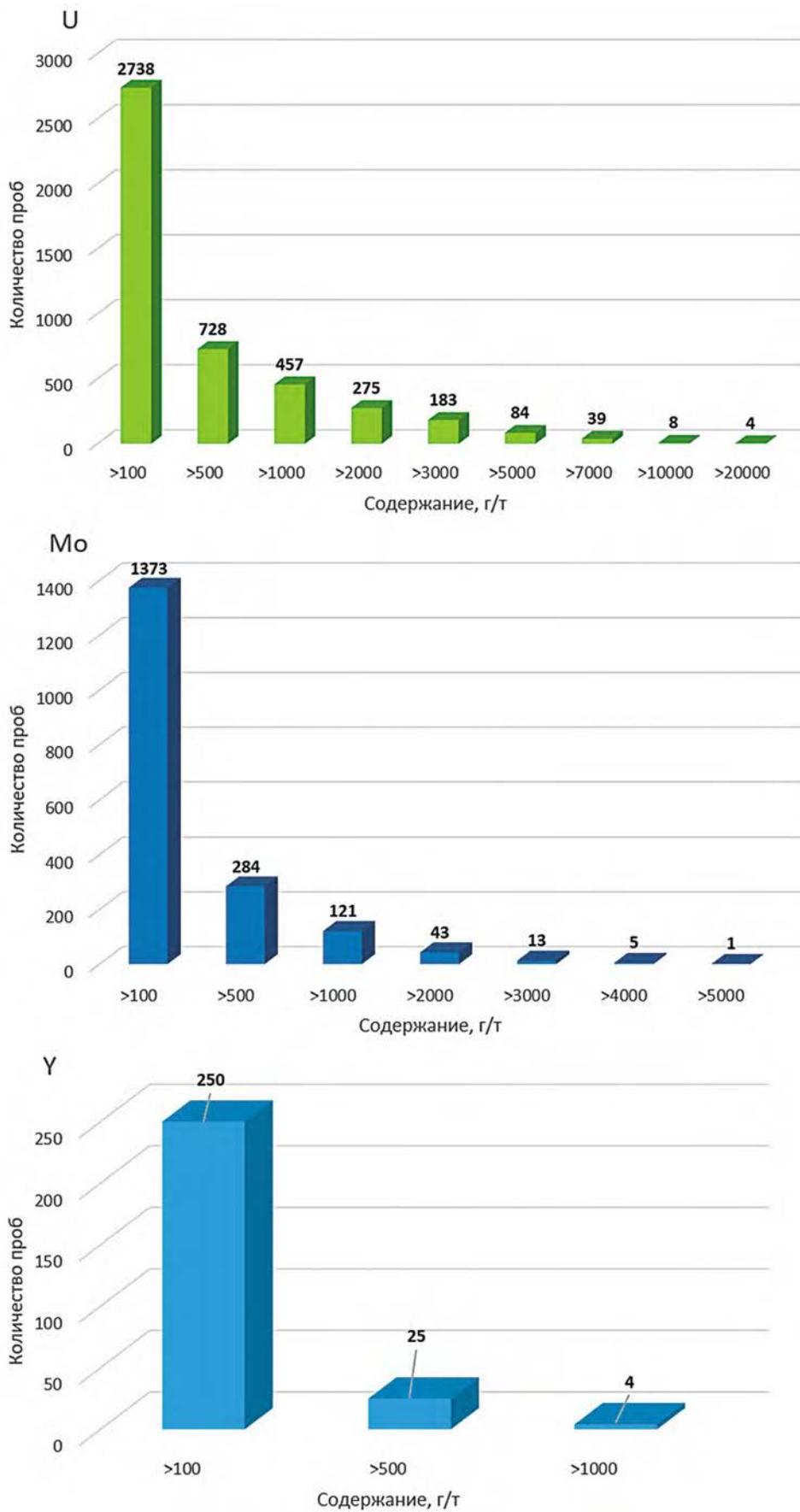


Рисунок 1. Содержание урана, молибдена и иттрия в рудах месторождения

Таблица 1
Содержания урана и РЗМ в проницаемых рудоносных отложениях месторождений ХРП

№ п/п	Содержание в г/т																
	U	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣLn+Y
1	18320	120	58	HO	13	53	11	2.6	10	2.5	16	3.5	11	1.8	12	IS	414
2	13250	190	37	73	88	32	8.1	1.6	64	2.4	20	5.0	19	38	29	4 8	400
3	9840	120	62	110	12	42	7.8	1.6	5,3	16	11	2.9	11	2.1	15	2.7	383
4	7800	56	42	73	88	35	7 2	1.7	4.6	12	6.6	1.5	3 8	0 68	3.9	066	206
5	7440	190	14	35	3.6	15	3 6	037	2.4	13	13	43	16	2.6	16	2.4	299
6	7010	230	19	52	5.5	19	5.1	0.52	36	li	15	4.9	18	3.0	19	29	372
7	5132	116	61	101	13	46	10	2.6	10	2.0	14	3.6	12	1.9	13	19	396
5	4650	45	62	272	22	87	16	4.1	14	1.7	8.0	1.44	43	0i6	38	058	518
9	4550	25	51	110	12	46	10	3.4	6 1	12	5.4	091	2.1	036	1.9	035	254
10	3610	23	46	84	И	36	6.1	1.2	3.7	084	4.0	080	19	0.40	2.3	0.45	200
И	3480	17	24	50	5.6	20	3.7	1.1	094	0.53	2.8	064	16	036	2.1	043	111
12	4970	25	37	63	8.1	25	4 9	3,4	3.5	064	3.5	0 78	2 6	0.42	3.0	051	150
13	2660	44	54	95	11	40	8 0	2,0	49	13	6.3	1.1	2.7	0 49	2.7	049	244
14	2360	40	47	81	10	36	7.1	1.8	4 8	12	5.7	1.0	2 6	0.45	26	0.45	217
15	2175	44	33	51	60	22	4.1	2.8	3.3	063	4.0	1.0	3.7	034	3.7	065	150
16	2473	53	25	38	48	16	3.0	0.82	2.4	048	3.0	0.75	2.6	039	2.7	048	132
17	1386	29	32	62	7.5	29	32	1.2	5.4	089	4.9	1.0	3.0	0.41	2.7	040	152
18	1052	31	42	73	9,0	36	6.7	1,9	5.1	0 9	48	095	29	039	2.6	038	182
19	640	68	150	250	31	110	IS	3.0	15	2.6	12	2.4	65	1.0	6.1	1.1	719
20	830	7	1	26	3.2	11	2.0	0.55	2.4	0.24	1.3	025	0 9	0.13	1.0	0 14	45
21	1560	14	18	20	3,5	11	2 0	0 68	1.5	029	1.7	040	13	021	1.5	025	63
22	288	19	30	51	5,9	20	3i	0.7	3.0	046	2.8	061	2.0	030	2.0	029	120
23	10	20	19	44	5	20	4i	1.2	2.3	0.72	3.6	067	13	025	1.1	022	108
		69															253

сооруженных в подзонах уранового оруденения эпигенетической зональности, при этом переработку продуктивных растворов осуществляют отдельно с опережающей сорбцией рения, для чего откачные селективные скважины обвязывают в отдельный коллектор, а зонирование откачных скважин осуществляют при сооружении скважин на эксплуатационных блоках. Техническим результатом является повышение эффективности переработки продуктивных растворов за счет существенного сокращения их объемов и значительного повышения содержаний в них полезных компонентов, что снижает капитальные и эксплуатационные затраты.

Способ извлечения рения из урановых растворов

Способ извлечения рения из урансодержащих растворов включает сорбцию рения слабоосновным наноструктурированным ионитом на стиролакрилатной матрице, содержащим функциональные группы циклогексиламина. Технический результат заключается в повышении селективности извлечения рения по отношению к урану, сокращении стадий «сорбция-десорбция» при очистке элюированных растворов рения от урана, улучшении сорбционно-десорбционных характеристик технико-экономических показателей сорбционного извлечения рения из урансодержащих растворов.

Таблица 2

Результаты опробования продуктивных растворов из скважин блоков В1.19 и В1.20 на U и РЗМ

Дата отбора	Место отбора	Результаты анализа, мг/дм ³				
		Th	U	Sc	Y	ΣLn+Y
27.04.2021	ВР 15–20 бл	3,0	0,24	0,40	13,6	66,1
06.06.2021	ВР суточная 15–20	2,7	0,46	0,38	14,1	66,7
13.06.2021	ПР Вершинное	4,3	97	0,41	14,9	71,1
04.05.2021	В1.20.06	2,4	230	0,20	10,6	56,4
17.06.2021	В1.20.06	2,6	181	0,31	11,1	57,0
04.05.2021	В1.20.08	2,9	128	0,26	11,2	57,0
17.06.2021	В1.20.08	4,2	205	0,41	14,2	77,4
04.05.2021	В1.20.10	4,4	219	0,35	13,5	71,5
04.05.2021	В1.20.12	5,9	243	0,35	15,1	79,2
17.06.2021	В1.20.12	0,9	181	0,10	11,8	44,1
04.05.2021	В1.20.14	2,2	184	0,20	14,7	75,3
13.06.2021	В1.20.20	2,0	199	0,19	15,7	64,8
21.05.2021	В1.19.22	1,8	80	<0,05	15,7	59,0
17.06.2021	В1.19.22	1,2	63	0,12	16,3	73,1
13.06.2021	В1.19.26	6,3	214	0,50	17,9	95,2
13.06.2021	В1.19.28	3,1	310	0,31	18,5	91,4

Способ извлечения рения из водных растворов активированным углем

Способ извлечения рения активными углями из водных растворов включает сорбцию рения модифицированным активированным углем, содержащим политетрафторэтилен. Технический результат заключается в повышении степени десорбции рения, сокращении расхода сорбента, увеличении концентрации товарного элюата по рению, улучшении сорбционно-десорбционных характеристик, технико-экономических показателей сорбционного извлечения рения из водных растворов.

Мобильная установка для извлечения попутных компонентов при скважинном подземном выщелачивании

Мобильная установка модульного типа предназначена для гидрометаллургии добычи металлов скважинным подземным выщелачиванием на месторождениях инфильтрационного типа. Задачей полезной модели является создание мобильной установки для извлечения попутных компонентов на селективно выделенных участках добычных блоков по индивидуальной перерабатывающей технологической схеме. Техническим результатом является заявленная мобильная установка модульного типа для извлечения металлов скважинным подземным выщелачиванием, состоящая из сборно-разборных модулей сорбционного передела с емкостным и насосным оборудованием и фильтров-патронов для очистки растворов от взвесей. Согласно полезной модели, модульная установка дополнительно содержит трубопровод для транспортировки продуктивных растворов, подключенный к селективному участку добычного блока и выполнена на платформе автомобильного шасси с компоновкой каскада сорбционных аппаратов фиксированной производительности, а заполнение сорбционных колонн ионоселективным сорбентом соответствует извлекаемому компоненту.

Разработанная технология может быть применена как при скважинном подземном выщелачивании полезных компонентов, так и при переработке руд полезных ископаемых кучным выщелачиванием.



ЛИТЕРАТУРА

- 1) Руденко А.А., Трошкина И.Д., Данилейко В.В. «Технология селективно-опережающей добычи рения на месторождениях СПВ» // Труды Второй научно-практической конференции «Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. Освоение, воспроизводство, использование». ФГБУ «ВИМС», 7–8 декабря 2021. С. 252–257.
- 2) Патент РФ № 2 768 332
- 3) Патент РФ № 2 627 838
- 4) Патент РФ № 2 796 648
- 5) Патент РФ № 218 606
- 6) Солодов И.Н., Соловьев А.А., Мешков Е.Ю. «Перспективы попутного с ураном извлечения ценных компонентов из продуктивных растворов в АО «Хиагда» // Труды Второй научно-практической конференции «Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. Освоение, воспроизводство, использование». ФГБУ «ВИМС», 7–8 декабря 2021. С. 275–283.

ПОЛМОСТУНДРОВСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ГРАНИТНЫХ ПЕГМАТИТОВ (ЛОВОЗЕРСКИЙ РАЙОН МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ)

*Русакова А.-М., Машковцев Г.А.
ФГБУ «ВИМС», Москва*

Российская сырьевая база лития входит в пятерку крупнейших стран-держателей запасов в мире. Однако на данный момент добыча лития на территории России не ведется, все перерабатывающие предприятия используют импортное сырье.

Цена на литиевое сырье растёт в связи с колоссальным ростом спроса из-за бурно растущих производства электромобилей, в которых используются литий-ионные аккумуляторы, и сферы высоких технологий.

Большая часть балансовых запасов лития в России сосредоточена в литиевых месторождениях редкометалльно-пегматитового типа со сподуменом. Полмостундровское месторождение – второе по объему запасов лития в Мурманской области. Оно расположено в Ловозерском районе и входит в состав Титовско-Поросозерской золото-молибден-редкометалльной металлогенической зоны Кольского полуострова. Район Полмостундровского месторождения расположен в пределах зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья (рис. 1). Редкометалльная минерализация в пегматитовых жилах Полмостундровского месторождения была открыта в 1952 году в ходе проведения геологической съемки масштаба 1:200 000, что позволило начать проведение комплексных исследований месторождения.

Проведение предварительных геологоразведочных работ на территории месторождения в 1954 г. позволило выявить основные черты геологического строения месторождения и установить высокие содержания сподумена в жилах пегматитов. Дальнейшие поисковые и геологоразведочные работы, проводимые на территории месторождения в 1956–1960 гг., были нацелены на выявление запасов Li_2O , что привело к утверждению постоянных разведочных кондиций и оценки запасов по категориям В, C_1 и C_2 (Протокол ГКЗ № 3281 от 09.02.1961). Однако в связи с развитием методов геологоразведки, увеличением их точности и качества, а также с изменением экономических параметров возникает необходимость в проведении полного комплекса геологоразведочных работ с последующим пересчетом запасов.

В 2023 году ФГБУ «ВИМС» в рамках выполнения проекта АО «Арктический литий» начал вести геологоразведочные работы на территории Полмостундровского месторождения. Комплекс геологоразведочных работ включает в себя бурение более 8 километров с последующей документацией и опробованием по сети 100×50 м по категории В, 200×100 м по категории C_1 , проведение горных работ, геофизические исследования скважин (ГИС), топографо-геодезические, гидрогеологические, геотехнические и геоэкологические работы.

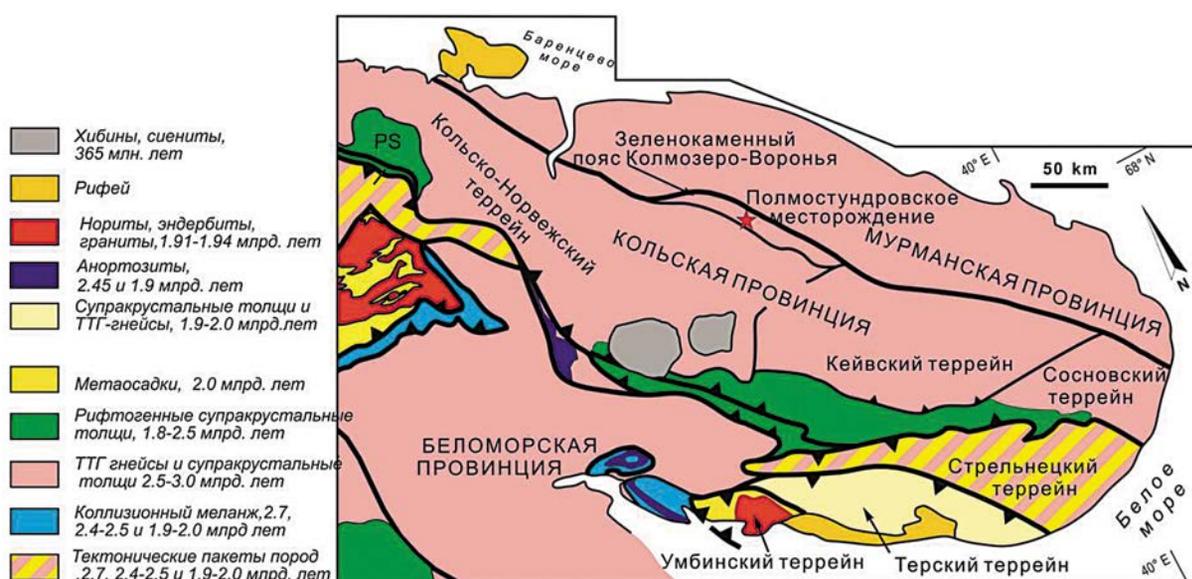


Рисунок 1. Тектоническая схема Кольского полуострова [5]

Геология района

В районе Полмостундровского месторождения встречаются протерозойские метаморфизованные породы, интрузивные комплексы архея, протерозоя и палеозоя, и четвертичные образования (рис. 2).

Протерозойские породы слагают центральную часть района и являются частью сутуры (зеленокаменного пояса) Колмозеро-Воронья [1], к северо-востоку погружаются под породы Мурманского микроконтинента. Центральная часть представлена полосами метаморфизованных вулканогенно-осадочных пород тундровской серии юго-восточного простирания. Тундровая серия включает лязозерскую, полмостундровскую и вороньетундровскую свиты.

Лязозерская свита (Pt_1lv) представляет собой метатерригенную толщу мощностью от 100 до 600 м, сложенную биотитовыми и гранат-биотитовыми гнейсами, протягивается узкой полосой вдоль южного борта сутуры.

Полмостундровская свита (Pt_1pv) представляет собой метавулканиды – сланцеватые амфиболиты, частью порфиробластические, нередко миндалекаменные с прослоями тонкозернистых амфиболитовых и биотитовых плагио-сланцев (измененных эффузивов среднего состава), частью метадиабазы. Образует выдержанную толщу толеит-андезито-базальтового состава мощностью от 300 до 1200 м. Амфиболиты частично сохранили структурные и текстурные признаки лав, в отдельных случаях – пиллоу-текстуры [1], также эти породы являются вмещающими породами пегматитовых тел (p_2Pt_1) Полмостундровского месторождения. В амфиболитах наблюдаются небольшие выходы поздних нижнепротерозойских интрузий метаперидотитов и метапироксенитов ($N\Sigma_1Pt_1$) и нижнепалеозойские дайки диабазов ($\beta\mu Pz_1$).

Вороньетундровская свита (Pt_1vr) сложена метавулканидами базальт-андезит-риолитовой серии непостоянной мощности (до 800 м), которые представлены измененными кварцевыми порфирами и кератофирами, реже диорит-порфирами и связанными с ними биотитовыми, двуслюдяными, мусковито-кварцевыми и др. сланцами, частью осадочными породами.

Породы Тундровской серии с северо-востока граничат с породами Кейвской серии червуртской свиты (Pt_1cr) палеопротерозойского возраста, представленной кианит-биотитовыми, кианит-ставролит-биотитовыми и ставролитовыми гнейсами (метаморфизованными туффитами и конгломератами).

Юго-западная часть района представлена ранними архейскими интрузиями олигоклазовых гранито-гнейсов (γ_1A), широко развитыми за пределами района. В этих породах встречаются небольшие выходы поздних нижнепротерозойских интрузий плагио-микроклиновых и микроклиновых гранитов (γ_2Pt_1).

В районе работ также встречаются четвертичные отложения, представляющие ледниковые валунные пески и супеси, озерные глины и пески, водно-ледниковые супеси, пески, гравийно-галечно-валунный материал и торфяники.

Редкометальные гранитные пегматиты

Жильные тела представлены пегматитами раннепротерозойского возраста (p_2Pt_1) северо-западного простирания с падением на северо-восток под углами 40–85°, залегают субпараллельно друг другу, максимальная мощность жил около 30 м; для вмещающих пород являются секущими с резким и отчетливым контактом. В пределах пегматитового поля встречаются тела с редкометальной минерализацией и без редкометального оруденения по периферии.

Пегматиты с редкометальной минерализацией разделяют на рудные, с промышленным содержанием оксида лития, и пегматиты с Be-Ta-Nb-Li-минерализацией [3].

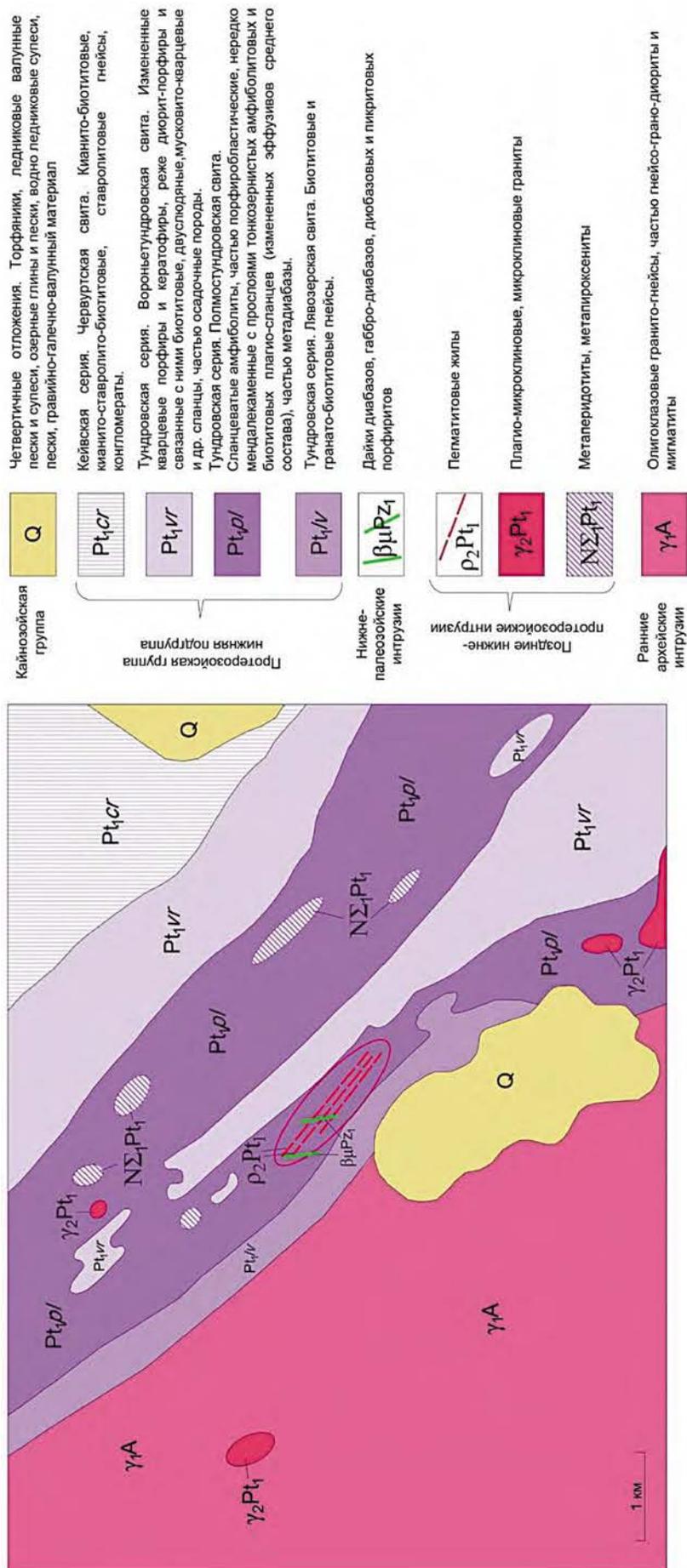


Рисунок 2. Схема геологического строения района Полmostундровского месторождения

Породообразующие минералы рудных тел Полмостундровского месторождения: кварц (30–50 %), альбит (10–70 %), сподумен (2–50 %) и микроклин (до 20 %). Второстепенные и акцессорные минералы: турмалин, мелкочешуйчатая слюда, мусковит, гранат, апатит, минералы группы колумбита, берилл, биотит, магнетит, литиофиллит, пурпурит, сиклерит, эвкрипит. Рудные тела можно разделить на пять структурно-минеральных разновидностей:

- **аплит (бедные руды)** содержит кварц и альбит (соотношение 1:3) с размерами зерен минералов от 1 до 3 мм. Рудные минералы представлены сподуменом (~5 %), минералами группы колумбита, мелкокристаллическим бериллом;
- **пегматит гранит-пегматитовой структуры (рядовые руды)** состоит из таблитчатого альбита, микроклина и кварца. Размер зерен минералов от 0,5 до 5 см. Рудные минералы представлены сподуменом (5–15 %), минералами группы колумбита и бериллом;
- **пегматит апографической структуры (бедные руды)** представлен микроклином с сантиметровыми (редко до 10 см) вростками кварца (до 20 %). Рудные минералы представлены сподуменом (2–3 %), минералами группы колумбита и бериллом;
- **пегматит блоковой структуры (бедные руды)** состоит из крупных блоков микроклина размером до 1,5 м в поперечнике. Микроклин альбитизированный, содержит вростки кварца (до 40 %) и альбита. Сподумен встречается в виде единичных кристаллов;
- **кварц-сподуменовый пегматит (богатые руды)** состоит из кварца и сподумена (до 20–50 %).

Источник оруденения

Источником редкометального оруденения в пределах Полмостундровского пегматитового поля предполагаются разновозрастные граниты, не имеющие выходов на поверхность. Однако повышенные концентрации Cs, Rb, В и Mn и исключительно локальное распространение пегматитов ставит под сомнение эту гипотезу [1]. В альтернативной гипотезе предполагается, что источником редкометальных гранитных пегматитов могли быть породы собственного зеленокаменного пояса, а именно – древних эвапоритов [4]. Предполагается, что повышенные концентрации Li, Cs, Rb, В и Mn контролировались участием в осадочно-вулканогенных разрезах металло- и боросных осадков, подвергшихся впоследствии метаморфизму и парциальному плавлению совместно с вмещающими породами, однако это не объясняет повышенные концентрации Nb и Ta.

Заключение

Геологическое и тектоническое строение, минералогия Полмостундровского месторождения хорошо изучены, для вмещающих пород известен источник вещества. Однако источник редкометального оруденения до сих пор не определен. Существует несколько гипотез, для доказательства которых необходимо провести более детальное исследование.

Изучение флюидных включений в минералах Полмостундровского месторождения позволило бы определить природу источника вещества, а также подтвердить или опровергнуть выдвинутые ранее гипотезы.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: интерпретация материалов по опорному профилю

- 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС / отв. исполнитель М.В. Минц. М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2010. Т. 1. 408 с.; Т. 2. 400 с.
- 2) Добржинская Л.Ф. Структурно-метаморфическая эволюция кольской серии. М.; Л., 1978. 147 с.
- 3) Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В., Жабин С.В. Геология рудных районов Мурманской области – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. 359 с.
- 4) Сеницын А.В. Региональная тектоника и металлогения раннего докембрия. Л.: Недра, 1990. 491 с.
- 5) Daly J. S., Balagansky V.V., Timmerman M.J., Whitehouse M.J. The Lapland-Kola orogen: Palaeoproterozoic collision and accretion of the northern Fennoscandian lithosphere //Geological Society, London, Memoirs. – 2006. – Т. 32. – №. 1. – С. 579–598.

МЕСТОРОЖДЕНИЕ БЕРИЛЛИЯ УЕНЧ В ЗАПАДНОЙ МОНГОЛИИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ И ПОЛУЧЕНИЯ КОНЦЕНТРАТА

*Соловьев А.С., Просекин А.С. – 1, Алгебраистова Н.К. – 2
1 – КОО «ВАБК», г. Улан-Батор, Монголия,
2 – Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

Цель работы – изучение вещественного состава бериллийсодержащей пробы с месторождения пегматитов Уенч, расположенного в Западной Монголии, изучение методов обогащения и подбор технологии производства бериллиевых концентратов.

Направление работы на сегодня весьма актуально, так как бериллий является востребованным редким металлом. Из-за уникальных свойств бериллия и его сплавов этот элемент называют металлом космической эры и высоких технологий. По экспертным оценкам, с учётом трендов технологического развития бериллий будет одним из самых востребованных металлов 21 века.

Общие запасы оксида бериллия в мире оцениваются в 1,44 млн т, в том числе подтверждённые – немногим более 191 тысячи тонн. 36 % общих мировых запасов заключено в недрах американского континента, 23 % – в Азии, 14 % – в Африке, 3 % – в Австралии. Общие запасы России составляют 16 % от мировых [1].

Как отмечалось на симпозиуме в С.-Петербурге, состояние бериллиевой промышленности в мире характеризуется непрерывными поисками новых месторождений и ростом добычи руд [5]. Добыча бериллиевых руд ведётся во Франции, Норвегии, Швеции, Финляндии, Кении, Афганистане, Республике Танзания. Основная масса бериллиевого сырья в США перерабатывается преимущественно на гидроксид, из которого получают всю необходимую продукцию. Придавалось и будет придаваться огромное значение увеличению производства бериллия, главным образом в связи с его спросом для новейших областей техники, в частности, ядерной промышленности (реакторостроение), авиации, управляемых снарядов, космической техники [1].

О значении бериллия в современных условиях красноречиво говорит подход США. Так, правительство этой страны всемерно стимулирует геологические изыскания и освоение новых месторождений бериллиевых руд. В Соединенных Штатах бериллий включен в I группу стратегических материалов, резервные запасы которых непрерывно

накапливаются в специальном национальном фонде, и на освоение месторождений которого выдаются ссуды и предоставляются займы на льготных условиях.

В постсоветской России добыча и извлечение бериллия оказались маловостребованы и были представлены главным образом добычей сырья в ограниченных объемах на месторождениях Урала и Забайкальского края, с дальнейшим получением концентрата, который далее перерабатывался до металла в Усть-Каменогорске в Казахстане. Основная часть концентрата была поставлена в Усть-Каменогорск еще до начала 2000-х годов, и накопленных запасов российского бериллиевого концентрата казахстанским металлургам хватило до начала 2010-х.

Повышение внимания российского правительства к авиационной и космической промышленности, к военно-промышленному комплексу внушает осторожный оптимизм и надежду на повышение внимания российских инвесторов и промышленных групп к исследованию и освоению новых месторождений в России и соседних странах. Мы уже наблюдаем бум интереса к месторождениям лития в России, вызванный большим спросом с одной стороны, и санкционными ограничениями с другой. Полагаем, что рост спроса ожидает в ближайшие десятилетия и бериллий.

Монголия с социалистического периода и по настоящее время служит поставщиком сырья для российских предприятий – медного концентрата, молибдена, вольфрама, плавикового шпата и так далее. В силу своих географических и геологических особенностей монгольские месторождения обладают преимуществами перед многими российскими: минимальная залесенность и в связи с этим отсутствие необходимости в вырубке лесов, каменистые и пустынные грунты и небольшое количество осадков определяют возможность значительно меньше и на более поздних этапах инвестировать в строительство транспортной инфраструктуры, по многим месторождениям в Монголии можно отметить и минимальный объем вскрышных работ. Как следствие, сроки освоения и введения в эксплуатацию монгольских месторождений короче российских на несколько лет при значительно меньших капитальных затратах.

В послевоенный период при помощи Советского Союза началось активное геологическое изучение всей территории Монголии. Месторождение пегматитов Уенч в Западной Монголии было открыто в 1960-х годах во время проведения геологической съемки в масштабе 1:200 000.

Монгольская компания КОО «ВАБК» (West Asia Berillium Company LLC) более 15 лет занимается изучением бериллия в Монголии. Для этого в 2008 году она получила четыре разведочные лицензии в Западной Монголии, аймаке Ховд, и одну разведочную лицензию в Центральной Монголии, аймаке Дорноговь.

Для изучения лицензионных участков компания КОО «ВАБК» неоднократно отправляла геологические партии для проведения геологических и геохимических работ. В результате работ были отобраны геохимические пробы и проведены их лабораторные исследования.

Пегматитовые тела с кристаллами берилла были обнаружены в процессе поисковых работ, проводимых в 2008 году. Из пегматитовых даек вручную, с помощью перфоратора и камнереза, было добыто около 10-15 кг кристаллов берилла на площади примерно один квадратный метр. Добытые кристаллы оказались трещиноватые и плохой окраски. Из дробленых остатков каменного материала были собраны кристаллы берилла с примерным определением структуры и формы, которые указаны на рис. 1.

Результат лабораторных исследований пробы ShM 19/7 показал содержание бериллия 0,0529% в пределах промышленных значений пегматитового типа месторождения.



Рисунок 1. Фрагменты кристаллов берилла, месторождение Уенч, Зап. Монголия

Как указано в отчетах советских геологов, которые исследовали пегматитовые площади месторождения Уенч в Западной Монголии в 1956-1980 годах, берилловую минерализацию можно ожидать в пегматитах, если вмещающие породы образованы материнскими гранитами. На исследуемых лицензионных площадях основная часть пегматитов развита в сланцах, соответственно без берилла, но представляющая интерес с точки зрения наличия в них мусковита с полевыми шпатами для керамического производства.

В пределах лицензионной площади были обнаружены кристаллы альмандина, по внешнему виду трещиноватые и подходящие только для технического применения и приуроченные к породообразующим структурам, в основном к сланцам (рис. 2-3).

Места опробования: гранитный выход длиной 1,3 км при ширине максимум 130 м, в нем были обнаружены маломощные дайки бериллоносных пегматитов с весьма неравномерным, гнездообразным распределением оксида бериллия (участки с высоким содержанием BeO перемежаются с бедными и безрудными). В пределах лицензий на космическом снимке были определены области распространения гранитов крупных размеров с телами пегматитов.

По мнению монгольских специалистов, в двуслюдяных сланцах, вмещающих пегматиты, можно обнаружить разновидности берилла: изумруды, гошенит, аквамарин, ростерит и другие. Источником вещества для пегматитов может служить любой кислый или



Рисунки 2–3. Образцы альмандина, месторождение Уенч, Зап. Монголия

щелочной магматизм, а сланцы – это просто вмещающие породы в данном случае. По аналогии, большинство уральских изумрудов находятся именно в слюдяных сланцах. Это мнение подтвердилось результатами поисковых работ полевого сезона 2018 года. Образцы бериллов, полученные в результате геологоразведочных работ (далее – ГРР), показаны на рис. 4.



Рисунок 4. Образцы бериллов на месторождении Уенч, Зап. Монголия

Для определения вещественного состава бериллия, который был обнаружен при проведении ГРР на месторождении пегматитов Уенч, были отобраны пробы пегматита для проведения опытно-промышленных исследований (далее – ОПИ). Пробы были отправлены в Сибирский федеральный институт, в лабораторию обогащения. Исходная проба поступила в Сибирский федеральный институт, на кафедру обогащения полезных ископаемых в 4 деревянных ящиках крупностью -160 мм.

В соответствии с контрактом № ИЦМ-082-3 от 02.06.2008 г. управлением Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по городу Москве было выдано санитарно-эпидемиологическое заключение, которое удостоверяет, что проба соответствует санитарным правилам СП2.6.2.798-99 «Ионизирующее излучение, безопасность. Обращение с минеральным сырьем и материалами с повышенным содержанием природных радионуклидов. Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99). Гигиеническая характеристика пробы представлена в табл. 1.

Для подготовки пробы к исследованиям разработана и реализована схема разделки пробы, представленная на рис. 5.

Дробление проводилось в две стадии с получением продукта крупностью -1 мм. После первой стадии дробления следовало поверочное грохочение на классы +20 мм и -20 мм.

Материал крупностью более 20 мм додрабывался. Подрешетный продукт крупностью менее 20 мм сокращался методом квартования. Руда массой 50 кг составила запас 1, остальная часть подверглась перемешиванию методом кольца и конуса и последующему сокращению, которое производилось с соблюдением расчета минимальной массы пробы.

От руды в крупности -1+0 мм были отобраны пробы на ПХА, спектральный, фазовый анализы и проба для металлургических исследований. Дробление материала осуществлялось на щековой дробилке типа ДЛЩ 80х150 и на валковой дробилке типа ДГ 200х125.

Таблица 1
Гигиеническая характеристика материала

Вещества, показатели (факторы)	Гигиенический норматив (СанПиН, МДУ, ПДК и др.)
СП 2.6.1.798-99 (НРБ-99) Аэфф.м	272
Удельная активность Бк/кг, менее	740
Удельная активность Бк/кг	216,5±55,3
Активность Ra-226, Бк/кг	49,7
Активность Th-232, Бк/кг	54,6
Активность K-40, Бк/кг	1065
Запах, балл	Не более 1

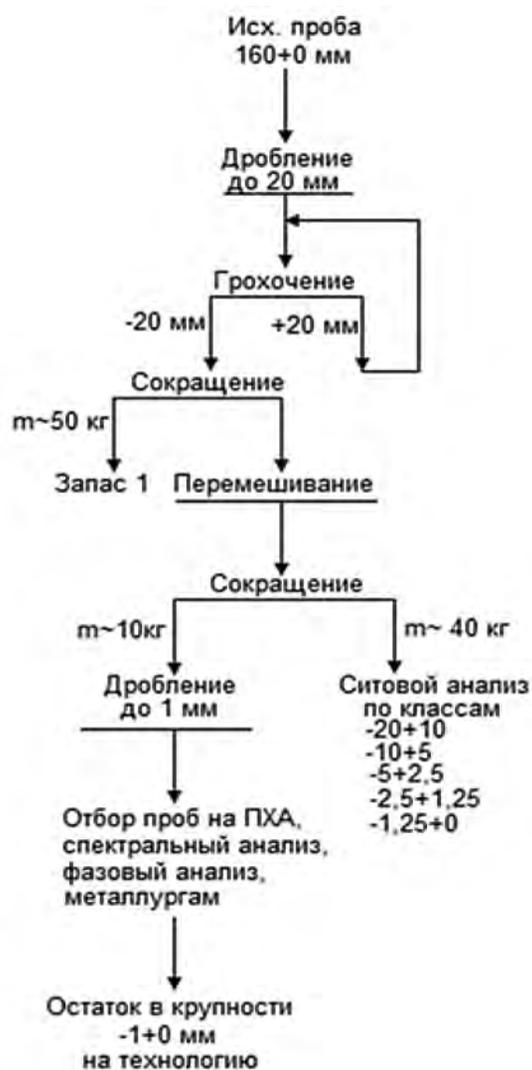


Рисунок 5. Схема подготовки пробы к исследованиям

Таблица 2

Количественный минералогический состав исходной пробы

№ п/п	Минералы	Количество, %
1	Берилл	74–78
2	Кварц	16–17
3	Микроклин	3
4	Анортоклаз	
5	Альбит	3
6	Мусковит (гидрослюды)	2,5
7	Турмалин	Ед.3
8	Гидроокислы железа (лимонит, гетит)	Ед.3

Рентгенофазовым, химическим и минералогическим анализами установлено, что в пробе присутствуют следующие минералы: берилл, кварц, полевые шпаты (микроклин, альбит, анортоклаз), мусковит, турмалин, гидроокислы железа, количественное содержание которых представлено в табл. 2.

Берилл составляет основную массу пробы (примерно 78 %), морфологически представлен призматическими кристаллами различных размеров: от крупных (5–10 см) до более мелких (1,5–2 см по удлинению) и их обломками. Огранка более четко выражена в мелких кристаллах, имеющих

габитус гексагональных призм; на гранях некоторых отмечается вертикальная штриховка. Большая часть кристаллов и обломков трещиноваты. Цвет берилла светлый, бледно-зеленоватых тонов, реже встречаются кристаллы, окрашенные более интенсивно – в голубовато-зеленоватые тона, как правило, менее трещиноватые и менее замещенные.

Многие кристаллы берилла подвергнуты замещению светлой слюдой (мусковит, гидромусковит), развивающейся по трещинкам и по поверхности граней минерала, и гидроокислами железа, придающими красновато-буроватые тона окраске минералов. Кристаллы берилла тесно ассоциируют с кварцем и полевыми шпатами, что особенно хорошо наблюдается под микроскопом и подтверждается рентгеноструктурными исследованиями.

Под микроскопом во всех бериллах отмечается интенсивная трещиноватость, трещинки разноориентированы, ширина их от волосовидных до 0,07–0,15 мм. Многие трещинки заполнены гидроокислами железа и кварца, часто к ним приурочены листочки (чешуйки) мусковита. Кроме того, включения кварца наблюдаются и на гранях кристалла, поэтому даже в монофракциях берилла, отобранных из сравнительно незамещенных кристаллов, рентгеноструктурным анализом фиксируется до 2 % кварца. По результатам рентгеноструктурного анализа бериллы разного цвета (бледно-зеленоватый и голубовато-зеленоватый) совершенно идентичны и соответствуют стандартному бериллу (по базе рентгенографических данных PDF, 2001 г.), т. е. не содержат повышенного количества щелочей, каких-либо примесей и воды (рис. 6).

Рентгеновские анализы выполнены на дифрактометре Шимадзу XRD 6000 в центре коллективного пользования СФУ лаборатории рентгеновских методов исследования.

Кварц в пробе преимущественно светло-серого и дымчатого цвета, образует прожилки мощностью 3–20 мм среди берилла и микроклина и включения в них различных размеров – от 1,0–2,0 до десятых и сотых долей миллиметра.

Микроскопические исследования показали, что кварц, помимо крупных прожилковых, гнездообразных выделений, развивается в многочисленных трещинках дробления в берилле и полевых шпатах в виде изометричных и несколько вытянутых овальных зерен, ширина которых лимитируется мощностью трещинок. Преобладающие размеры – 0,03–0,10 (0,25x0,07) мм. Кроме этого, кварц образует отдельные включения в зернах минерала изометричной формы, в микроклине отмечается пегматитовая (графическая) структура с закономерным вращением зерен кварца, размер кварца варьирует в пределах сотых и десятых долей миллиметра.

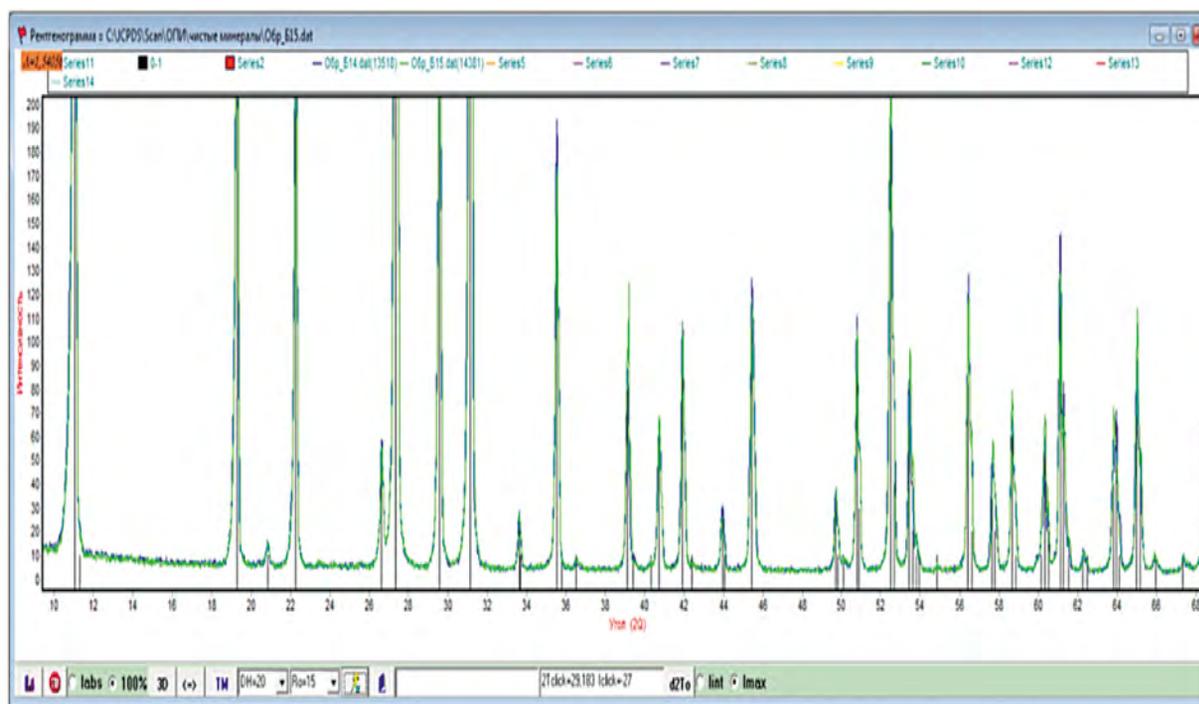


Рисунок 6. Сравнение: образец Б14 (преобладающий берилл) – синяя рентгенограмма, образец Б15 (берилл зеленовато-голубоватый чистый) – зеленая рентгенограмма

Полевые шпаты в пробе представлены в основном альбитом и микроклином, в редких случаях выявляется анортоклаз. Оба минерала (альбит и микроклин) тесно взаимосвязаны друг с другом, так как в микроклине обычно проявляется пертитовая структура, представляющая вростики белого альбита среди микроклина.

Микроклин наблюдается в виде прожилков розового, кремового цветов в ассоциации с бериллом, кварцем, с выраженной пертитовой структурой. Прожилки розового микроклина (видимо, более позднего образования) имеют мощность 5–6 мм, кремновые выделения микроклина более крупные, очевидно, блоковой структуры, в пробе представлены обломками в сростании с кварцем.

Под микроскопом выделяются крупные кристаллы микроклина призматического габитуса, неправильной формы, в ряде зерен видна характерная микроклиновая решетка, спайность в 2-х направлениях. Размеры зерен измеряются по удлинению от 1 до 2–5 мм. Среди микроклина выделяются отдельные кристаллы и пертитовые «штрихи» альбита, зерна кварца и чешуйки слюды.

В некоторых образцах под микроскопом наблюдаются неправильные зерна микроклина со слабо выраженной микроклиновой решеткой и небольшим углом $2V$, приблизительно меньше 30° , что более соответствует анортоклазу. Данные рентгеноструктурного анализа подтверждают наличие анортоклаза в пробе.

Альбит образует белые зернистые, иногда пластинчатые агрегативные включения и пертитовые выделения в микроклине. Пертиты имеют вид «штришков» или веревок длиной 3–10, шириной до 0,3–0,5 мм.

Микроскопически альбит наблюдается в виде призматических кристаллов и пертитовых выделений с хорошо выраженными полисинтетическими двойниками. По замерам угла симметричного погасания двойников, равного $7-8^\circ$, зерна соответствуют альбиту, что подтверждается рентгеноструктурным анализом. Фазовый анализ образцов

микроклин-пертитов разного цвета указывает на наличие 80–85 % микроклина, 15–20 % альбита и 0,5–2 % кварца. Размеры зерен альбита измеряются десятными долями миллиметра.

Слюда в пробе белого цвета, с перламутровым блеском, представлена мусковитом и гидрослюдой. Мусковит развивается по бериллу преимущественно по зонам трещиноватости, дробления, образуя прожилки и гнездообразные выделения размером до 0,5–2,0 см. Более мелкие чешуйки отличаются на гранях кристалла, поверхности зерен. Под микроскопом мусковит проявляется в виде чешуек, пластинок с высокими цветами интерференции, размером (0,16x0,03)–(0,5x0,12) мм, распределяющихся преимущественно по трещинкам в ассоциации с кварцем.

Кроме этого, более мелкие чешуйки слюды (гидрослюды) распределяются по поверхности зерен берилла и микроклина, размеры (0,2x0,02)–(0,08x0,05) до 0,03–0,01 по удлинению. Гидрослюда отличается более низким двупреломлением, в проходящем свете белая, бесцветная, более всего соответствует гидромусковиту. Турмалин представлен шерлом (черная разновидность, содержит железо), встречается в виде единичных призматических зерен в ассоциации с бериллом, размером до 2 см по удлинению. Трещиноват.

Гидроокислы железа довольно распространены в виде тонких дисперсных включений, окрашивающих берилл, развивающихся по трещинкам, а также псевдоморфоз по пириту в форме кубиков, размерами 1–5 мм. Под микроскопом наблюдаются тонкие включения гидроокислов железа (лимонит) буровато-желтого цвета, размеры которых имеют тысячные и сотые доли миллиметра. Иногда встречаются агрегативные овальные, прожилково-прерывистые скопления лимонита по трещинкам берилла в ассоциации с кварцем, размеры агрегатов 0,2–0,3 мм по удлинению. Реже наблюдаются обломки изометричных зерен красновато-коричневого цвета, обладающих анизотропностью (гетит) размером ~0,05 мм.

Силикатный химический анализ показал, что основными компонентами в пробе являются SiO_2 – 69,8 % и Al_2O_3 – 17,61 %.

Контрольными анализами на оксид бериллия в ООО «РОС-ШПАТ» гравиметрическим методом с использованием электронных весов RV-214 определено, что в исходном материале содержание оксида бериллия 11,19 %, т. е. по массовой доле этого компонента продукт, присланный для исследований, удовлетворяет техническим условиям ТУ 95.1982-89 для концентрата бериллиевого флотационного и соответствует высшему сорту. Содержание сопутствующих компонентов не является браковочным признаком. Напрашивается вывод, что поступивший на исследование продукт – **концентрат, полученный после ручной выборки**.

С целью определения распределения компонентов по классам крупности выполнен рассев исходного материала в крупности -20+0 мм на стандартных ситах. Результаты гранулометрического состава представлены в табл. 3.

Анализ показал, что распределение оксида бериллия пропорционально выходам. Массовая доля ценного компонента изменяется при этом от 11,42 до 10,13 %, причем крупные классы имеют более высокое содержание.

Промышленные минералы бериллия по своим физико-химическим свойствам близки к минералам пустой породы. Берилл, фенакит и бертрандит немагнитны, непроводники, имеют плотность от 2,6 до 3 г/см³, т. е. такую же плотность, как основные минералы пустой породы.

Поэтому магнитная, электрическая сепарация и гравитационные методы обогащения к ним неприменимы [7, 12, 17].

Таблица 3
Распределение компонентов по классам крупности

Класс крупности	Выход, %	Массовая доля, %										Распределение, %									
		BeO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	F	MnO	SiO ₂	CaO	Li ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O	BeO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	F	MnO	SiO ₂	CaO	Li ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O
-20 +10	65,77	11,42	20,27	0,49	0,0031	0,0089	64,46	0,11	0,14	0,76	0,81	67,13	66,01	61,61	58,57	56,97	65,48	61,49	66,09	62,23	64,40
-10 +5	16,63	10,99	20,44	0,59	0,0031	0,0098	64,75	0,12	0,14	0,87	0,86	16,33	16,83	18,76	14,81	15,86	16,63	16,96	16,71	18,01	17,29
-5 +2,5	8,56	10,83	20,13	0,50	0,0028	0,0098	65,36	0,12	0,14	0,87	0,85	8,28	8,53	8,18	6,88	8,17	8,64	8,73	8,60	9,27	8,80
-2,5 +1	2,37	10,47	19,39	0,53	0,0062	0,0120	66,28	0,13	0,14	0,88	0,87	2,22	2,28	2,40	4,22	2,77	2,43	2,62	2,38	2,60	2,49
-1 +0	6,67	10,13	19,25	0,71	0,0081	0,0250	66,25	0,18	0,13	0,95	0,87	6,04	6,35	9,05	15,52	16,23	6,82	10,20	6,22	7,89	7,02
Исходная руда	100	11,19	20,20	0,52	0,0035	0,0103	64,75	0,12	0,14	0,80	0,83	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

В настоящее время применяют или могут быть применены следующие методы переработки бериллиевых руд:

- **ручная сортировка, основанная на различии цвета бериллиевых минералов.** Применяется в забое, а также после различных стадий дробления при наличии крупнозернистого берилла от 10 мм (иногда от 6) и крупнее; избирательное измельчение, основанное на высокой твердости берилла, хризоберилла, фенакита. Применяется при наличии в руде мягких пород, например, слюдистых сланцев, талька;
- флотация для руд с мелкой вкрапленностью ценных минералов с использованием собирателей анионного (жирные кислоты) и катионного типов;
- **рентгенорадиометрическое обогащение, представляющее собой автоматическую сортировку по наведенной радиоактивности облучением бериллиевой руды γ -лучами.** Избирательно наведенная активность фиксируется счетчиком, который связан с исполнительным механизмом, сбрасывающим куски берилла с конвейерной ленты в приемники для концентрата, возможно также выделение пустой породы из товарной руды, поступающей на флотацию;
- комбинированные процессы переработки, включающие флотацию бедных руд и химико-металлургическую переработку богатых руд и флотационных концентратов. Процесс предусматривает перемешивание измельченной руды и концентратов с химическими реагентами, окускование их, обжиг при 820–980°C (в зависимости от типа руды), химическое выщелачивание бериллия с последующей фильтрацией и удалением примесей, добавлением к фильтрату каустической соды для получения гидроксида, а затем и оксида бериллия.

Учитывая вещественный состав анализируемой пробы, для руды месторождения Уенч аймака Ховд перспективны первые из указанных методов обогащения и метод рентгенорадиометрического предобогащения с дальнейшей флотацией полученного промпродукта.

Представленные части проделанной работы по исследованию образцов месторождения Уенч создают основу для дальнейшего изучения и освоения месторождения с российским участием. Предстоит провести обширные исследования, оценить запасы и обосновать целесообразность освоения месторождения в современных условиях. Однако уже сейчас можно оценить потенциал проекта – исследование бериллиевого месторождения Уенч с российским инвестиционным участием может стать одной из «точек сборки», «точек активации и активизации» российско-монгольского сотрудничества в сфере горнодобывающей промышленности, включающей в себя совместные научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Польшин С.И. Обогащение руд и россыпей благородных металлов [Текст]: учебник для студ., обуч. по спец. Обогащ.полез.ископ. 2 изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1987. 428 с.
- 2) Липпа Л.А. Базовая схема обогащения бериллиевых руд [Текст] / А.А. Липпа, В.П. Кузнецов // Цветные металлы. – 1983. № 8.
- 3) Минеральное сырье. Бериллий [Текст]: справочник / И.И. Куприянова, Е.П. Шпанов, М.И. Новикова и др. // Справочник. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. – 43 с.
- 4) Состояние и перспективы мирового рынка бериллия [Текст]: <http://forum.iranafom.ru/ofivirsion/index.php/t534.html> [Электронный ресурс].
- 5) Техногенные источники редких металлов [Текст] / Н.А.Солодов // II Междунар. симп. «Проблем. комплекс. использ. руд». С.-Петербург, 20–24 мая, 1996: Тез.докладов.
- 6) Peres, A.F.C. Flotability of beryl and lithium minerals [Text] / Peres A.F.C, Leonel C.M.L., Valadao G.E.S. // Froth Flotat. Proc. 2nd Lat.Amer.Congr., Concepcion, 19–23 Aug.1985. – Amsterdam, 1988.
- 7) Требования промышленности к качеству минерального сырья. Бериллий [Текст]: справочник для геологов / А.И. Гинзбург, А.Д. Ершов и др. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 40 с.
- 8) Beryllium [Text]/ Chegwiddden S// Metals and Miner.Annly Rev, 1995.
- 9) 9. Обогащение редких и редкоземельных металлов [Текст] // Горный журнал. 2007. № 2.
- 10) Faria, A.A. Flutuabilidade seletiva no sistema berill-fluorita [Text] / A.A. Faria, A.E. Clark Peres // 10 Enaontro nac.trat.mineriose hidromed. Colet.trab.Encontro, Belo Horizonte, 1984.
- 11) Ануфриева С.И. Технология доводки бериллиевых концентратов с целью снижения их радиоактивности [Текст] / С.И. Ануфриева, Э.А. Журкова, В.В. Матиас, Н.Д. Тютюнник // Горный журнал. 2003. № 1.
- 12) Зубков А.А. Обогащение руд редких металлов с использованием ультразвука [Текст] /А.А. Зубков, Б.Г. Белов // Цветные металлы. 1982. № 3.
- 13) Мязин В.П. Сертификация и управление качеством минеральной продукции горнодобывающего комплекса [Текст]. Чита, 2001.

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОТИТАНИСТЫХ РУД, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИХ ОБОГАТИМОСТЬ

*Сычева Н.А., Кыджды М.В., Жукова В.Е., Шувалова Ю.Н.
ФГБУ «ВИМС», Москва*

Значение титана в современном мире трудно переоценить. Благодаря своим уникальным свойствам – легкости, прочности, коррозионной и термической стойкости, нетоксичности и биологической совместимости с человеческим организмом – металл нашел широкое применение в авиакосмической, химической, оборонной, лакокрасочной, бумажной и пищевой промышленности, черной и цветной металлургии, машиностроении и медицине. Использование титана в такой разнообразии отраслей делает его одним из ключевых элементов современной промышленности и технологического развития.

Россия обладает внушительной минерально-сырьевой базой титана. На долю нашей страны приходится 15 % мировых запасов. Однако титанодобывающая промышленность у нас практически не развита. Значительная часть запасов связана с коренными месторождениями, характеризующимися низким качеством и трудной обогатимостью руд, сложными горнотехническими условиями разработки, расположением в труднодоступных районах с неразвитой инфраструктурой. В результате предприятия России, выпускающие титановую продукцию, вынуждены работать на импортном сырье. До 2022 года основным поставщиком титанового сырья была Украина. В связи с изменившейся геополитической обстановкой наша страна стала закупать сырье у Вьетнама, Африки и ряда других стран. Необходимо развивать собственную добычу и производство титана на основе отечественных месторождений для обеспечения сырьевого суверенитета страны. В 2022 году правительством РФ был утвержден перечень основных видов стратегического минерального сырья, в котором титан занял седьмое место после нефти, природного газа, гелия, урана, марганца и хрома.

Среди коренных месторождений одним из перспективных источников получения титана являются высокотитанистые руды ильменитового типа, не требующие сложных схем переработки в отличие от титаномagnetитовых руд. В рамках поисково-оценочных работ нами были изучены минералого-технологические особенности руд одного из таких объектов.

Высокотитанистые ильменитовые руды данного рудопроявления, приуроченные к габбро-норитам и анортозитам, представляют интерес как объект для получения ильменитового концентрата с повышенным содержанием ванадия. В основной своей массе руды представлены крепкими зеленовато-серыми неизменными породами с вкрапленной текстурой, средне- и крупнозернистой структурой, и отличаются простым минеральным составом: преобладают плагиоклаз, пироксен и ильменит, в подчиненном количестве присутствуют кварц, биотит и сульфиды. Содержание TiO_2 в руде составляет 9,23–11,16 %, V_2O_5 – 0,095–0,12 %, P_2O_5 – 0,28–0,31 %, MnO – 0,27–0,30 %, Cr_2O_3 – 0,043–0,051 %, $S_{общ}$ – <0,01–0,59 %. Лишь незначительная часть руд интенсивно изменена: ильменит лейкоксенизирован, породообразующие минералы практически полностью замещены вторичными минералами (монтмориллонитом, доломитом, амфиболом, хлоритом, тальком, серпентином, халцедоном, каолинитом и

гидроксидами железа). В них развиты структуры замещения: псевдоморфная, коррозионная и реликтовая.

Изучение вещественного состава руд позволило установить ряд специфических особенностей, непосредственно влияющих на их обогатимость и качество получаемого концентрата. К ним относятся: форма нахождения полезного компонента, характер сростаний с породообразующими минералами, раскрываемость рудного минерала, вторичные изменения, элементный состав и физические свойства рудных и породообразующих минералов.

Основной формой нахождения титана в руде является ильменит, представленный двумя морфологическими разновидностями.

Ильменит первой разновидности (ильменит I) формирует основной объем руды, образует вкрапленность в норитах, габбро-норитах и анортозитах, приуроченную главным образом к выделениям пироксена. Минерал встречается в виде зерен неправильной, субидiomорфной, реже – идиоморфной формы размером от сотых долей миллиметра до 5 мм, преобладают зерна размером 0,5–1 мм (рис. 1).

В ильмените часто наблюдаются включения сульфидов и породообразующих минералов. Они имеют округлые и неправильные очертания, размеры от сотых долей миллиметра до первых миллиметров. Включения сульфидов представлены пирротинном, пиритом, халькопиритом и пентландитом, включения породообразующих минералов – биотитом, пироксеном и плагиоклазом.

Границы сростаний ильменита I с пироксеном и сульфидами в основном ровные, гладкие, реже неровные, заливообразные, с плагиоклазом – ровные или волнистые, с биотитом – коррозионные.

Ильменит I практически не содержит вторичных изменений. Иногда наблюдается незначительная лейкоксенизация минерала по ослабленным зонам, трещинам и границам с включениями сульфидов. Лишь в наиболее измененных участках руды ильменит I интенсивно лейкоксенизирован и замещен анатазом с образованием частичных и полных псевдоморфоз.

Ильменит второй разновидности (ильменит II) встречается в подчиненном количестве. Минерал развивается вдоль трещин отдельности и спайности пироксена и плагиоклаза в виде тонких пластинок (рис. 2).

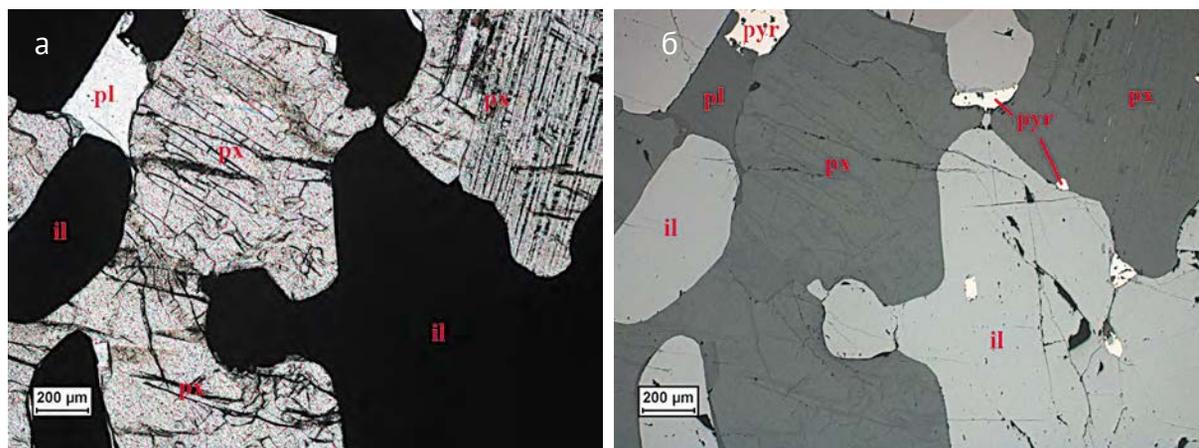


Рисунок 1. Ксеноморфные и субидiomорфные зерна ильменита в руде; il – ильменит, px – пироксен, pyr – пирротин, pl – плагиоклаз. Проходящий свет, николи параллельны (а); отраженный свет, николи параллельны (б)

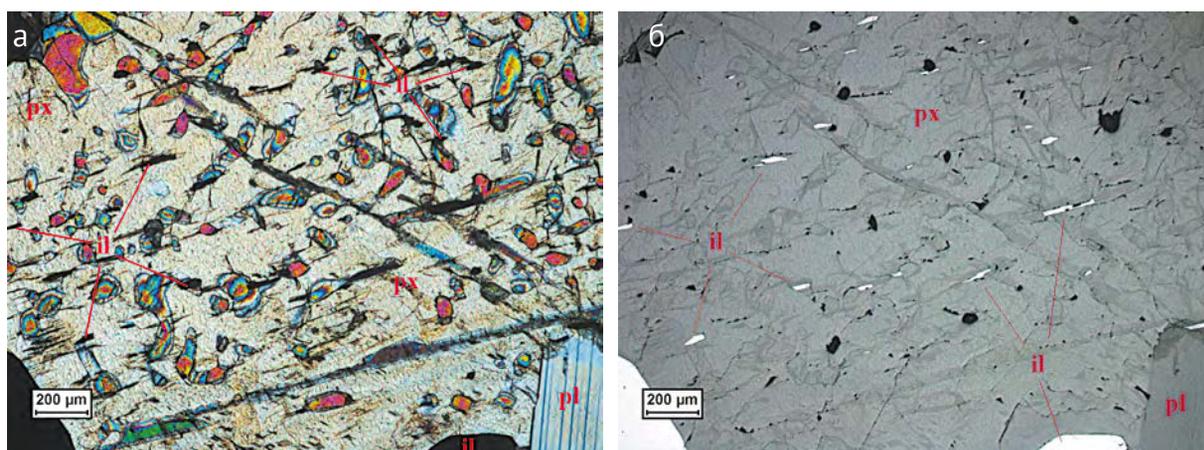


Рисунок 2. Пластинчатые выделения ильменита II в пироксене; il – ильменит, px – пироксен, pl – плагиоклаз. Проходящий свет, николи скрещены (а); отраженный свет, николи параллельны (б)

Присутствие тонких вrostков ильменита II в породообразующих минералах способствует повышению их плотности и удельной магнитной восприимчивости.

Характер раскрываемости ильменита I и II изучался на материале классов ситового анализа. В руде выделяются три типа сростков. К сросткам первого типа относятся сростки ильменита I с породообразующими минералами (пироксеном, плагиоклазом) (рис. 3 а). Их раскрываемость зависит от природной крупности ильменита I в руде и характера границ срастаний с породообразующими минералами. Чем ровнее границы срастаний, тем легче происходит разделение минералов.

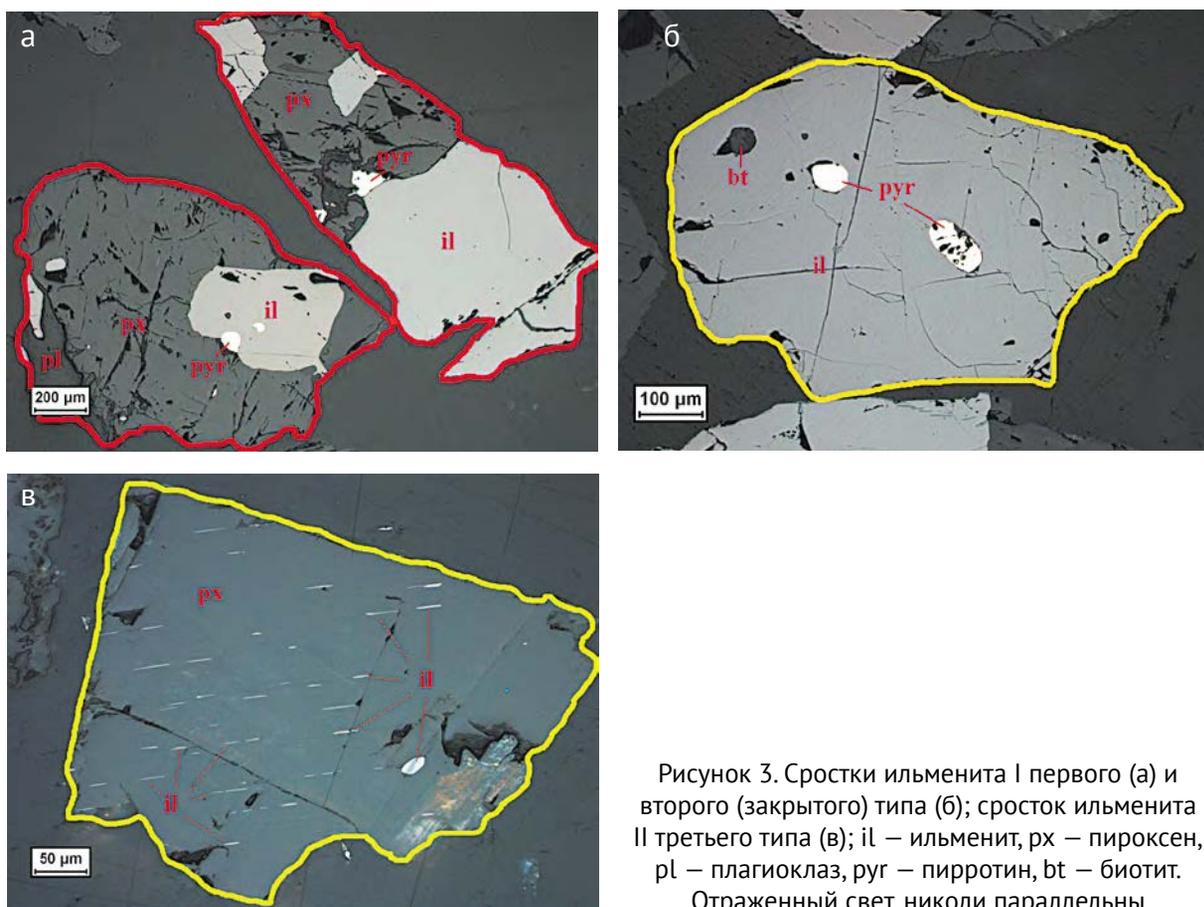


Рисунок 3. Сростки ильменита I первого (а) и второго (закрытого) типа (б); сросток ильменита II третьего типа (в); il – ильменит, px – пироксен, pl – плагиоклаз, pyr – пирротин, bt – биотит. Отраженный свет, николи параллельны

К сросткам второго (закрытого) типа относятся зерна ильменита I, содержащие включения сульфидов и породообразующих минералов (рис. 3 б). Раскрытие таких сростков наступает в результате разрушения зерен ильменита I и зависит от крупности и формы включений. Как правило, часть таких сростков может быть раскрыта в материале тонких классов крупности.

Сростки третьего типа представлены зернами пироксена и плагиоклаза, содержащими тонкие пластинчатые вростки ильменита II (рис. 3 в). Они относятся к бедным сросткам, не раскрываются даже в самом тонком материале.

Результаты раскрытия ильменита в материале классов ситового анализа приведены на рис. 4.

Преобладающая крупность ильменита I в руде составляет 0,5–1 мм. В связи с этим, большая часть минерала раскрывается в материале классов крупности $-1+0,5$ мм и $-0,5+0,2$ мм (49 % и 74 % свободных зерен соответственно). Оставшиеся более мелкие зерна ильменита I раскрываются в материале крупностью $-0,2+0,1$ мм (87 %). Незначительное увеличение количества свободных зерен ильменита в материале тонких классов крупности $-0,1+0,074$ мм и $-0,074+0,044$ мм (93 % и 95 % соответственно) происходит в результате частичного раскрытия сростков закрытого типа. Полного раскрытия минерала не наблюдается в связи с присутствием в руде бедных сростков третьего типа.

Элементный состав ильменита определен методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), результаты приведены в табл. 1.

Установлено, что среднее содержание титана в минерале составляет 30,72 %, следовательно, максимально возможное содержание TiO_2 в ильменитовом концентрате не

Таблица 1
Элементный состав ильменита, %

Метка спектра	O	Mg	Al	Si	Sc	Ti	V	Mn	Fe	Всего
Спектр 1	33,74	1,02	0,02	0,2	0,06	30,8	0,39	0,33	33,42	100
Спектр 2	34,41	0,9	0	0,17	0	30,4	0,42	0	33,73	100
Спектр 3	33,06	0,93	0	0,31	0,06	31	0,43	0,7	33,47	100
Спектр 4	34,04	1,14	0	0,23	0,01	30,6	0,52	0,72	32,71	100
Среднее:	33,81	1,00	0,01	0,23	0,03	30,72	0,44	0,44	33,33	100

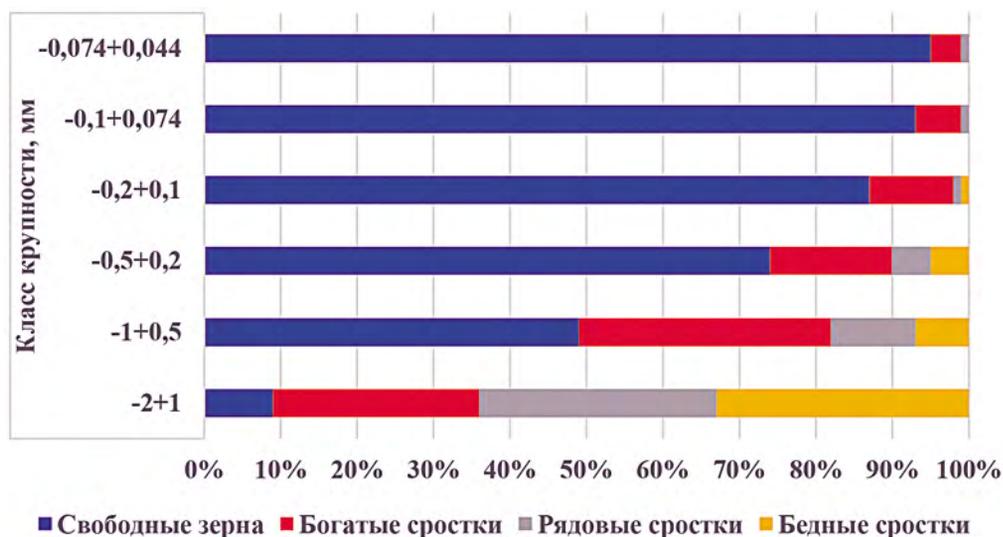


Рисунок 4. Раскрытие ильменита в материале ситового анализа

может превышать 51,24 %. Кроме того, ильменит содержит изоморфные примеси магния (0,9–1,14 %), марганца (0–0,72 %) и ванадия (0,39–0,52 %), что отражается на технологических свойствах минерала, в частности – уменьшении его плотности и удельной магнитной восприимчивости.

Ильменит, как было отмечено выше, образует сростания главным образом с пироксеном, в меньшей степени – с плагиоклазом.

В руде присутствуют два пироксена: ромбический и моноклинный. Первый преобладает. Он встречается в виде ксеноморфных, реже идиоморфных зерен размером первые миллиметры. Максимальный размер выделений составил 12 мм. В шлифах ромбический пироксен светло-бурый, имеет высокий рельеф, резкую шагреновую поверхность, прямое угасание и интерференционные окраски первого порядка. Минерал участками замещается пластинчатой разновидностью серпентина (баститом), в меньшей степени тальком и амфиболом.

Ромбический пироксен повсеместно содержит пластинчатые вросстки моноклинного пироксена, возникшие в результате распада твердого раствора (рис. 5). Иногда наблюдаются реакционные каймы моноклинного пироксена на границе между ромбическим пироксеном и плагиоклазом. Реже встречаются самостоятельные выделения минерала размером до 4 мм.

В шлифах моноклинный пироксен практически бесцветный, с высоким рельефом и резкой шагреновой поверхностью. Отличается косым угасанием и более высокими интерференционными окрасками второго порядка.

Элементный состав пироксенов определен методом РСМА. Результаты приведены в табл. 2 и 3.

По элементному составу ромбический пироксен соответствует высокожелезистой разновидности – гиперстену, моноклинный – диопсиду.

Таблица 2

Элементный состав ромбического пироксена, %

Метка спектра	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Всего
Спектр 1	42,16	13,13	0,46	25,16	0,51	0,19	0,35	17,97	0,08	100
Спектр 2	43,19	12,10	0,48	24,69	0,62	0,14	0,25	18,24	0,29	100
Спектр 3	42,16	12,08	0,36	25,16	0,83	0	0,29	19,00	0,12	100
Спектр 4	42,17	11,95	0,46	25,05	0,61	0,16	0,36	19,25	0	100
Среднее:	42,42	12,32	0,44	25,02	0,64	0,12	0,31	18,62	0,12	100

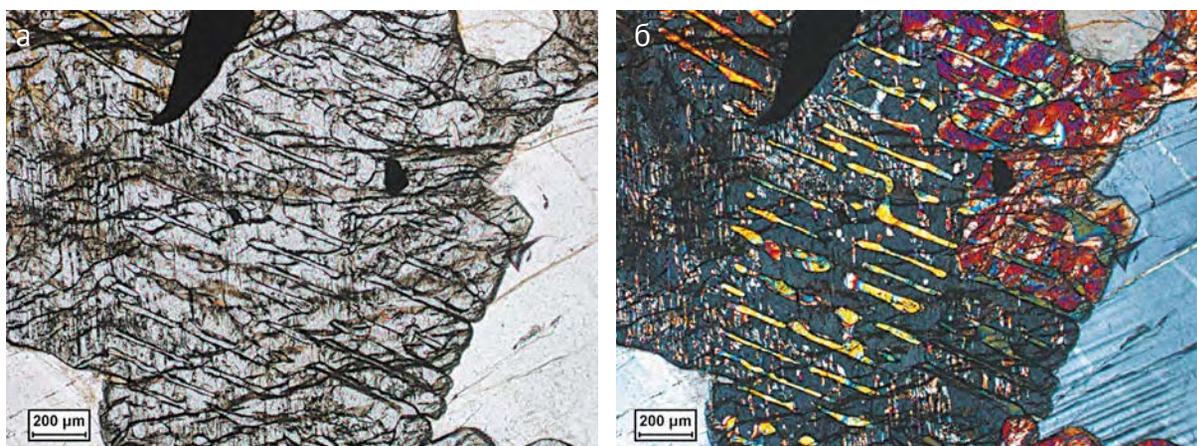


Рисунок 5. а) Ромбический пироксен с вростками моноклинного пироксена, николи параллельны; б) то же, николи скрещены. Проходящий свет

Таблица 3

Элементный состав моноклинного пироксена, %

Метка спектра	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Всего
Спектр 1	43,19	0,27	8,21	0,57	24,48	14,41	0	0,24	0,06	0	8,57	100
Спектр 2	44,09	0,30	8,12	0,80	24,63	14,39	0,18	0,14	0,35	0	7,00	100
Спектр 3	42,86	0,24	8,33	0,73	24,74	14,82	0,12	0,15	0	0,18	7,83	100
Спектр 4	42,80	0,14	8,52	0,46	25,19	15,23	0,21	0,01	0	0,15	7,28	100
Спектр 5	43,53	0,11	8,35	0,59	24,87	15,65	0,08	0,11	0	0,04	6,67	100
Среднее:	43,29	0,21	8,31	0,63	24,78	14,90	0,12	0,13	0,08	0,07	7,47	100

Плагиоклаз присутствует в виде зерен таблитчатой и ксеноморфной форм размером до 14 мм, преобладающий размер составляет первые миллиметры. Практически во всех зернах наблюдаются полисинтетические альбитовые двойники, по максимальному углу симметричного угасания которых (метод Мишель-Леви) определен номер плагиоклаза $An_{40}-An_{60}$, соответствующий андезину и лабрадору. Данные по элементному составу плагиоклаза, полученные методом РСМА, подтвердили результаты определения состава плагиоклаза оптическим методом. Содержание Na в минерале составило 4,15 %, Al – 15,71 %, Si – 26,17 %, Ca – 7,03 %. Плагиоклаз в основном «чистый», без вторичных изменений. В отдельных участках руды минерал разбит трещинами, по которым развиваются гидроксиды железа, серпентин и хлорит. В интенсивно измененной руде плагиоклаз полностью сосюритизирован.

С целью изучения контрастности руды по гравитационным и магнитным свойствам были измерены плотность, удельная магнитная восприимчивость и проводимость ильменита и породообразующих минералов, отобранных минералогом вручную с помощью стереоскопического микроскопа (рис. 6).

Плотность определялась объеметрическим методом в барометрической трубке (метод М.М. Василевского) [1], удельная магнитная восприимчивость – мостовым методом, проводимость – двухэлектродным методом измерения сопротивления. Результаты приведены в табл. 4.

Для успешного разделения минералов гравитационными методами минимальная разница в плотности должна составлять около 1 г/см³ [2]. В нашем случае данному условию удовлетворяет разница в плотности ильменита и плагиоклаза (1,95 г/см³). У ильменита и пироксена эта разница практически минимальна (1,09 г/см³), что обуславливает низкую контрастность гравитационных свойств. Ильменит и пирротин по плотности неконтрастны.

Близкие значения удельной магнитной восприимчивости ильменита и пироксена определяют низкую контрастность этих минералов по магнитным свойствам. Напротив, высокие значения удельной магнитной восприимчивости пирротина и

Таблица 4 – Физические свойства минералов

Минерал	Плотность, г/см ³	Удельная магнитная восприимчивость, м ³ /кг	Сопротивление, Ом	Твердость по шкале Мооса
Ильменит	4,64	140*10 ⁻⁸	32,3±19,8*10 ³ (n=20)	5–6
Пирротин	4,95	6500*10 ⁻⁸	2,37±0,9 (n=20)	4
Пироксен	3,55	66*10 ⁻⁸	≥1*10 ⁹	5–6
Плагиоклаз	2,69	13*10 ⁻⁸	≥1*10 ⁹	6–6,5

Примечания: 1) пирротин присутствует в сростаниях с другими сульфидами (халькопиритом, пиритом и пентландитом); 2) «n» – количество измерений.

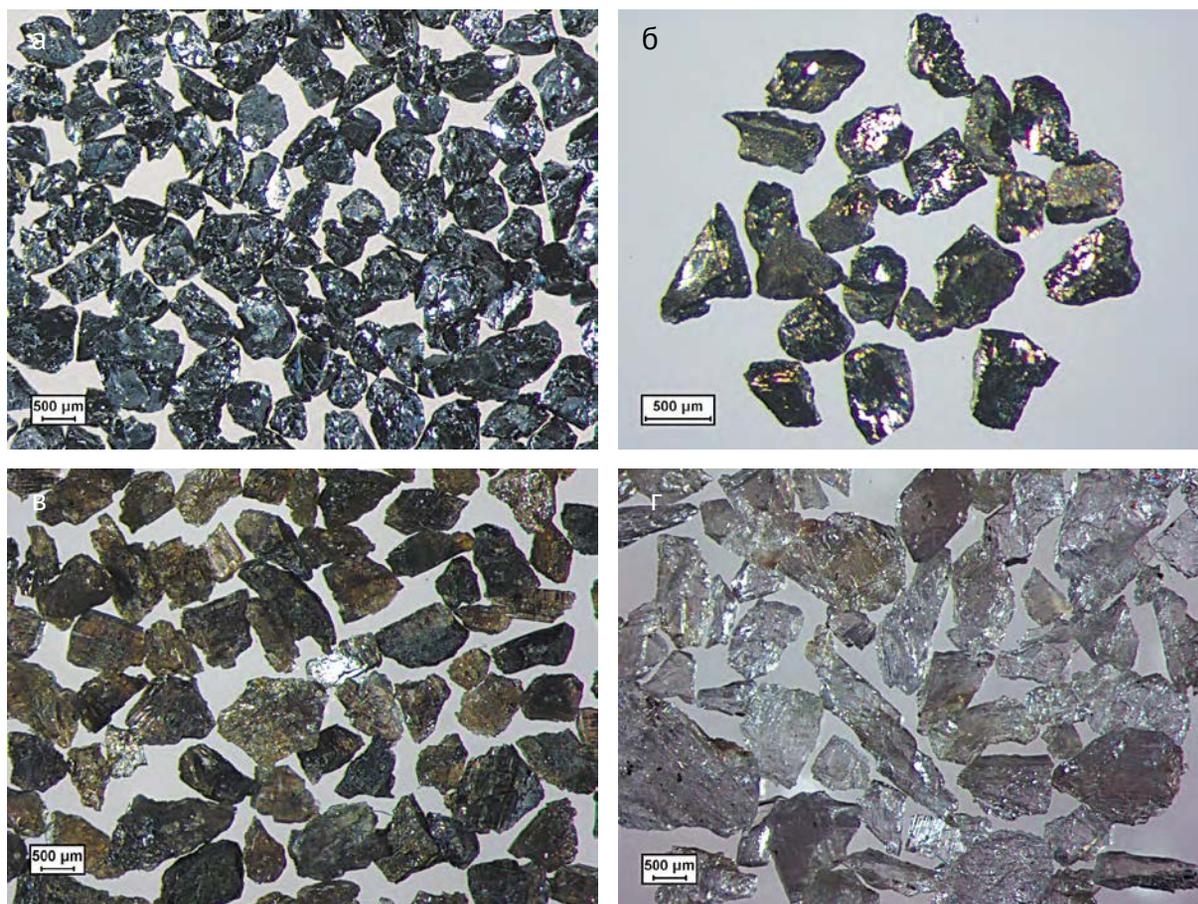


Рисунок 6. Мономинеральные фракции ильменита (а), пирротина (б), пироксена (в) и плагиоклаза (г)

низкие – плагиоклаза, по сравнению с удельной магнитной восприимчивостью ильменита, способствуют их селективному разделению магнитными методами.

Значительная разница величины сопротивления минералов, обуславливающая высокую контрастность их электрических свойств, поскольку ильменит является полупроводником, пирротин – проводником, а пироксен и плагиоклаз – диэлектриками, позволяет эффективно разделять их электрическими методами.

Минералогические особенности руд позволили установить благоприятные и неблагоприятные факторы для их обогащения. К первым относятся текстурно-структурные особенности, низкое содержание вредных примесей (хрома, фосфора и марганца) и высокая контрастность электрических свойств ильменита и породообразующих минералов. Неблагоприятным фактором является низкая контрастность магнитных и гравитационных свойств ильменита и гиперстена, обусловленная с одной стороны высоким содержанием в последнем железа и присутствием тонких пластинчатых вростков ильменита, с другой – изоморфными примесями магния, марганца и ванадия в ильмените. Кроме того, ильменит и пирротин имеют весьма незначительную разницу в плотности, что не позволяет разделять их гравитационными методами. Включения сульфидов и нерудных минералов в ильмените будут частично попадать в ильменитовый концентрат, снижая содержание в нем титана. Часть титана, связанная с пироксенами и биотитом, будет неизбежно попадать в хвосты.

Авторы глубоко признательны доктору геолого-минералогических наук Л.Т. Ракову и кандидату геолого-минералогических наук В.А. Рассулову, выполнившим измерения

удельной магнитной восприимчивости и проводимости ильменита и породообразующих минералов, и оказавшим помощь в интерпретации полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Методические рекомендации НСОММИ № 31 «Определение плотности минералов объеметрическим методом (в барометрической трубке)» М., 1991.
- 2) Изоитко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. С. 35.

СОРБЦИЯ РЕНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ КОНЦЕНТРАТА КОНДЕНСАЦИИ ФУМАРОЛЬНЫХ ГАЗОВ

Трошкина И.Д. – 1, Гакиев А.Л. – 1, Штейнберг М.Г. – 2

1 – Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва

2 – ООО Институт вулканологии и геодинамики, г. Москва

Рений – редчайший элемент периодической системы с кларком в земной коре 0,0007 г/т. Благодаря высокой температуре плавления и пластичности применяется как легирующая добавка в суперсплавах (78 %) [1], из которых изготавливаются детали двигателей в авиа- и космической технике, и как компонент катализаторов риформинга в нефтеперерабатывающей промышленности. Из-за низкой распространенности извлечение рения возможно только попутно из молибденитовых и медных концентратов [2].

На территории Российской Федерации к нетрадиционным сырьевым источникам (рис. 1) относятся парогазовые фумарольные выбросы (рис. 2) и вулканические породы вблизи вулкана Кудрявый, находящегося на острове Итуруп (Сахалинская обл.).



Рисунок 1. Сырьевые источники рения

Содержание в фумарольных газах на одном из полей – Рениевом – варьируется от 0,28 до 2,53 г/т [3]. Рений в вулканических газах присутствует в виде сульфида рения (ReS_2) [4].

Для получения концентрата рения из фумарольных газов сотрудниками ВНИИХТа разработана опытная установка, включающая фильтр для концентрирования элементов и их соединений (рис. 3). В результате работы установки сотрудниками ВНИИХТ был получен концентрат, внешний вид которого отражен на фотографии (рис. 4).

Цель работы – сорбция рения из растворов реагентного выщелачивания концентрата, полученного при охлаждении фумарольных выбросов.

С использованием масс-спектрального метода с индуктивно-связанной плазмой в Российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева был выполнен элементный анализ концентрата на приборе Thermo Fisher Scientific (США). Данные по составу концентрата представлены в табл. 1.

В работе рений извлекали из концентрата с помощью реагентного выщелачивания. По окончании выщелачивания был проведен анализ растворов на содержание рения масс-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой. Концентрация рения в растворе выщелачивания составила 12,8 мг/л.

Для исследования возможности сорбции рения из полученного раствора использовали сорбенты: слабоосновный анионит Puromet MTA 1701 (компания Purolite), активированный уголь ВСК (ОАО «ЭНПО «Неорганика»), а также углеродный композит ВСК-НТ, изготовленный в РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Сорбцию проводили в статических условиях. При проведении эксперимента сорбент контактировали с раствором при соотношении фаз Т:Ж = 1:40 в течение 7 ч. После контакта проводили разделение фаз и фильтрацию жидкой фазы через фильтр «белая лента».

Результаты сорбции рения выбранными материалами представлены в табл. 2.

Все выбранные сорбенты достаточно полно извлекают рений из раствора



Рисунок 2. Фумарольное поле, вулкан Кудрявый



Рисунок 3. Опытная установка по получению концентрата (АО ВНИИХТ)



Рисунок 4. Внешний вид концентрата

Таблица 1

Элементный состав концентрата, полученного при охлаждении фумарольных выбросов вулкана Кудрявый

Элемент	Концентрат, г/т
Re	1690
Mo	3900
In	2,86

Таблица 2

Сорбция рения из растворов выщелачивания материалами различного типа

Сорбент	Концентрация рения после сорбции, мг/л	Коэффициент распределения, мг/г	Степень сорбции, %
ВСК	4,78	0,162	77,2
ВСК-НТ	2,61	0,184	87,6
Purolite A170	3,38	0,176	77,1

выщелачивания концентрата, сорбционная емкость по рению увеличивается в ряду: ВСК < Puromet MTA1701 < ВСК-НТ.

Методом ограниченного объема раствора изучена кинетика сорбции рения лучшим материалом – углеродным композитом ВСК-НТ. Интегральная кинетическая кривая сорбции рения этим композитом представлена на рис. 5.

Математическую обработку данных кинетической кривой проводили по моделям псевдо-первого, псевдо-второго порядка (рис. 6), модели Еловича и модели внутренней диффузии Вебера-Морриса. С наибольшим коэффициентом детерминации R^2 (0,9889), данные описываются по модели псевдо-второго порядка с константой $0,012 \text{ г}\cdot\text{мг}^{-1}\cdot\text{мин}^{-1}$.

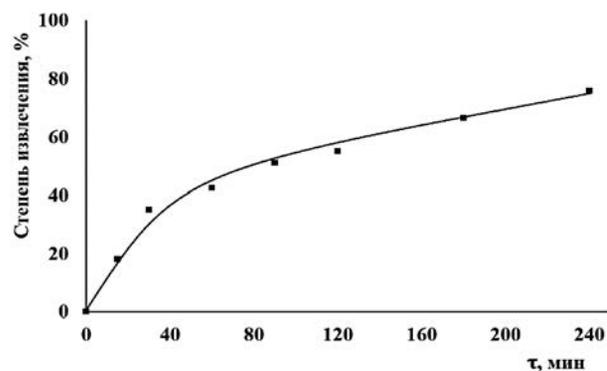


Рисунок 5. Интегральная кинетическая кривая сорбции рения активированным углем ВСК-НТ

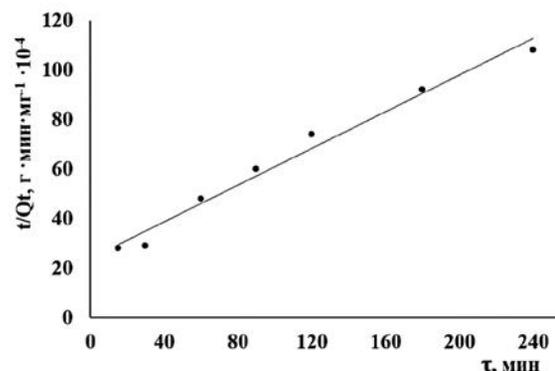


Рисунок 6. Анаморфоза кинетической кривой в координатах модели псевдо-второго порядка

Поскольку кинетическая модель псевдо-второго порядка носит формальный характер и не позволяет выявить лимитирующую стадию процесса, кинетические данные были проанализированы с помощью внутридиффузионной модели Вебера-Морриса. Если прямая проходит через начало координат, то сорбцию лимитирует внутренняя диффузия. В случае сорбции рения углеродным композитом прямая не проходит через начало координат – процесс может протекать во внешне- или смешаннодиффузионной области.

ВЫВОДЫ

- 1) Показана возможность сорбции рения из растворов реагентного выщелачивания концентрата охлаждения фумарольных газов вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Сахалинская обл.) с использованием материалов различного типа. Равновесная емкость по рению увеличивается в ряду сорбентов: ВСК < Puromet MTA1701 < ВСК-НТ.
- 2) Установлено, что сорбция на углеродном композите ВСК-НТ протекает в диффузионной области с константой скорости $0,012 \text{ г}\cdot\text{мг}^{-1}\cdot\text{мин}^{-1}$.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Brainard, J. The availability of primary rhenium as a by-product of copper and molybdenum mining. *Mineral Economics*, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13563-023-00392-0>.
- 2) Палант А.А., Трошкина И.Д., Чекмарев А.М., Костылев А.И. Технология рения. М.: ООО «Галлея-Принт», 2015. 329 с.
- 3) Кременецкий А.А., Чаплыгин И.В. Содержание рения и редких металлов в газах вулкана Кудрявый (остров Итуруп, Курильские острова) // Докл. Академии наук. Геохимия. 2010. Т. 430, № 3. С. 365–370.
- 4) Синегрибов В.А., Сотсков К.В., Юдин А.А. Извлечение ценных элементов из фумарольных газов // Химическая технология. 2007. N 3. С. 97–101.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ С ПОЛУЧЕНИЕМ КОАГУЛЯНТОВ

*Тужилин А.С., Балмаев Б.Г., Ветчинкина Т.Н., Заблоцкая Ю.В.
ИМЕТ РАН, Москва*

В настоящее время коагулянты для очистки питьевых и сточных вод в России получают, главным образом, из гидроксида алюминия. При этом потребность в них неуклонно растет и поиск нового сырья для получения коагулянтов является актуальным вопросом [1–7]. Одним из его видов может служить минеральное алюминийсодержащее сырье, например, каолиновая глина Суворовского месторождения Тульской области.

Исследование минералогического состава каолиновой глины показало, что основными ее минералами являются: каолинит (40,0–57,7 %), кварц (10,2–33,4 %), гематит (4,7–8,1 %), маггемит (5,1 %), силлиманит (5,1 %), гроссит (8,2–17,0 %). По своему химическому составу глина содержит, %: 30,7–34,2 Al_2O_3 , 1,5–4,5 Fe_2O_3 , 47,5–50,8 SiO_2 , 0,1–2,0 CaO и 7–17 П.П.П. В ней нет вредных примесей, которые могли бы оказать негативное влияние на состав полученных коагулянтов.

Основным минералом каолиновой глины является каолинит, который не разлагается серной и соляной кислотами. В процессе термической обработки глин при температуре свыше 500°C происходит разложение каолинита с образованием метакаолинита. Прокаленный метакаолинит активен по отношению к кислотам, в результате чего алюминий переходит в раствор в большей степени, чем кремний.

Проведены исследования влияния термического разложения глины на степень извлечения Al_2O_3 в сернокислотные и солянокислотные растворы с использованием двух параметров: температуры и продолжительности прокаливания. Исходную глину предварительно измельчали до крупности $\leq 0,5$ мм, а затем прокаливали в муфельной печи. Температуру прокаливания изменяли от 600 до 700°C; время — от 60 до 120 мин.

Прокаленные глины разлагались в течение 90 мин. в 20 %-ных растворах соляной и серной кислот в реакторе с мешалкой, установленном в термостат. Температура пульпы составляла 80–90°C. Полученную пульпу фильтровали на вакуумной установке. Образующийся кек сушили и взвешивали, измеряли объем фильтрата и промывочных вод. По результатам химического анализа растворов и кекка определяли извлечение Al_2O_3 в растворы серной и соляной кислот.

Зависимости степени извлечения Al_2O_3 в раствор при разложении глины серной и соляной кислотами от температуры прокаливания представлены на рис. 1, 2.

При температуре прокаливания 600–650°C в течение первых 60–90 минут степень извлечения Al_2O_3 в растворы возрастает. Увеличение продолжительности прокаливания до 120 минут не приводит к изменению степени разложения HCl , а при использовании H_2SO_4 наблюдается даже незначительное ее снижение. Повышение температуры до 700°C при разложении глины сернокислотными растворами позволяет достичь степени перевода Al_2O_3 в раствор более 90 %. Химический состав глины после прокаливания при температуре 650–700 °C в течение 60–90 мин. составил, %: 38,5 Al_2O_3 , 2,3 Fe_2O_3 , 58,4 SiO_2 , 0,1 CaO .

В результате последующего кислотного разложения глины степень извлечения Al_2O_3 в растворы серной кислоты составила 92–94 %, а в растворы соляной кислоты – 76–78 %.

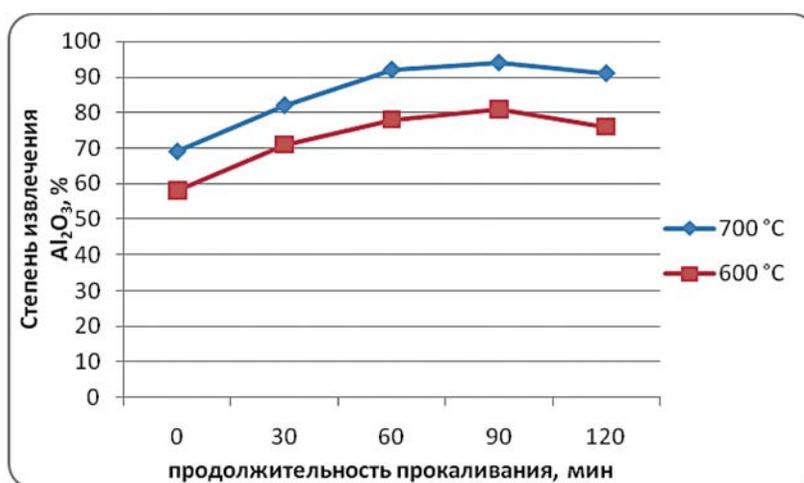


Рисунок 1. Зависимость степени извлечения Al_2O_3 серной кислотой из прокаленной глины при различных температурах от продолжительности прокаливания

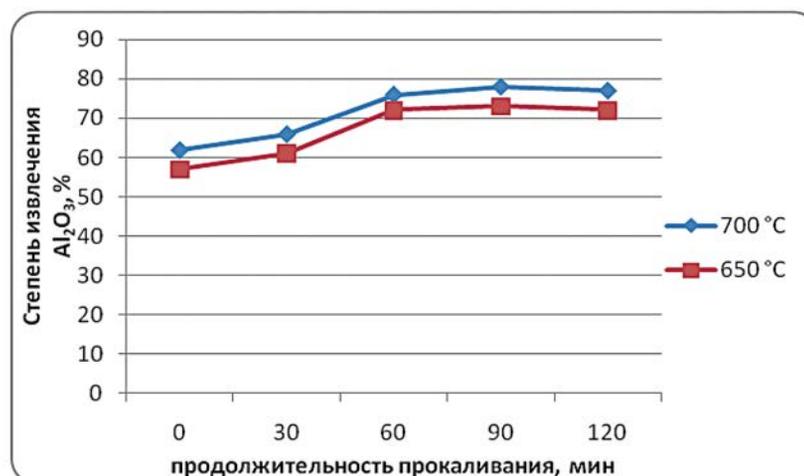


Рисунок 2. Зависимость степени извлечения Al_2O_3 соляной кислотой из прокаленной глины при различных температурах от продолжительности прокаливания

Полученные после фильтрации кислые растворы, содержащие сульфат и гидроксид алюминия, могут быть в дальнейшем использованы в качестве коагулянтов для очистки различных питьевых или сточных вод.

Работа выполнена в рамках гос. задания № 075–01176–23–00.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Аймурзаева Л.Г., Жумаева Д.Ж. Технология получения адсорбента-коагулянта на основе ангреноского каолина и мирабилита // *Universum: химия и биология: электрон. научн. журн.* 2022. 2(92). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/13027>.
- 2) Мамаджанов З.Н., Шамшидинов И.Т., Абдуллаев А.Н. и др. Изучение коагулирующей способности сульфата алюминия на основе ангреноского каолина // *International scientific journal SCIENCE AND INNOVATION.* 2022. № 4. С. 199–207.
- 3) Tuzhilin Aleksey Sergeevich, Balmaev Boris Grigorievich, and Vetchinkina Tatiana Nikolaevna. Comparative Technical-and-Economical Evaluation of Production Costs of Coagulant from Technical-Grade Aluminum Hydroxide and Hydroxide Sludge in IV Congress “Fundamental research and applied developing of recycling and utilization processes of technogenic formations”, *KnE Materials Science*, 6 (1). 2020, pages 344–349. DOI 10.18502/kms.v6i1.8108.
- 4) I.A. Kuranga, A.B. Alafara, F.B. Halimah, A.M. Fausat, O.B. Mercy, B.C. Tripathy Production and Characterization of Water Treatment Coagulant from locally sourced Kaolin Clays // *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* January, 2018 Vol. 22 (1) 103–109.
- 5) Наимов Н.А., Рузиев Дж.Р., Аманджони Г. и др. Комплексная переработка каолиновых глин месторождения «Зидды» // *Доклады Академии наук Республики Таджикистан.* 2018, том 61, № 3. С. 286–292.
- 6) F. Chigondo, B.C. Nyamunda, V. Bhebhe. Extraction of Water Treatment Coagulant from Locally Abundant Kaolin Clays // *Journal of Chemistry* Volume 2015, Article ID 705837, 7 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/705837>.
- 7) Shamshidinov I.T., Mamadaliev A.T., Mamajanov Z.N. Optimization of the process of decomposition of aluminosilicate of clays with sulfuric acid // *The First International Conference on Eurasian scientific development.* – 2014. – С. 270–275.

К ВОПРОСУ ПОИСКОВ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ЛАНДШАФТНЫХ УСЛОВИЯХ УЗБЕКИСТАНА

Турамуратов И.Б.

ГП «Институт минеральных ресурсов», г. Ташкент, Республика Узбекистан

Проблема поисков оруденения, не выходящего на поверхность, и прогнозная оценка скрытого под молодыми отложениями благороднометального, полиметаллического и др. оруденения в настоящее время стоит перед геологической службой большинства стран с развитой горнодобывающей промышленностью.

Известно, что в Узбекистане фонд «легкооткрываемых» объектов золота, серебра, вольфрама, меди и некоторых других металлических полезных ископаемых уже в большей мере выявлен и освоен, в то время как фонд «труднооткрываемых», скрытых на глубине месторождений может представить еще огромные резервы. Выявление

и освоение таких резервов становится одним из главных путей для удовлетворения растущих потребностей перерабатывающих мощностей в минеральном сырье.

Учитывая вышесказанное, задача укрепления, расширения сырьевой базы действующих горнодобывающих и перерабатывающих предприятий и создания новых отраслей промышленности требует от геологов осуществления широкой программы работ не только по традиционно открытым (не перекрытым мезокайнозойскими отложениями значительной мощности) территориям, но и по планомерному изучению перспектив выявления оруденений, не выходящих на поверхность – как скрытых месторождений в открытых территориях, так и перспектив закрытых под мезокайнозойскими отложениями территорий, которые в республике составляют около 85 %. Рассмотрим проблему на примере месторождений золота, играющих ведущую роль в экономике республики.

Согласно сведениям геологической службы США, разведанные запасы золота в мире насчитывают 52 тыс. тонн, основную часть которых (72 %) составляют 7 промышленных типов месторождений (рис. 1) [24].

Учитывая локальность размещения уникальных месторождений золотоносных конгломератов, можно заключить, что наиболее перспективными в мировом масштабе являются коренные месторождения золота 6-ти промышленных типов. Их примерами служат такие крупнейшие объекты (с запасами, превышающими 300 т золота), как месторождение Мурунтау (Узбекистан), месторождения Невады (Карлин, Голдстрайк, Кортес и др., США), Олимпиада, Нежданское, Наталка и Сухой Лог (Россия), Пуэбло-Вьяхо (Доминиканская Республика), Грасберг (Индонезия), Кейдиа-Ист, Лихир (Австралия), Лоуло-Гоункато, Садиола (Мали), Кибали (Конго), Ашанти (Гана), Кумтор (Киргизия), Бакырчик (Казахстан) и т. д.

А для условий Узбекистана, исходя из результатов многолетнего геологического изучения, маловероятно обнаружение месторождений трёх типов – золотоносных конгломератов, новых месторождений комплексных медно-порфировых руд и



Рисунок 1. Распределение мировых запасов золота по геолого-промышленным типам в 2023 г., % (оценка ИАЦ «Минерал»)

золото-сульфидно-кварцевый в зеленокаменных поясах древних щитов. Наиболее вероятными для выявления крупных месторождений золота в Узбекистане являются четыре геолого-промышленных типа: золоторудный в углеродсодержащих песчано-сланцевых толщах складчатых систем, золото-полисульфидный в терригенно-карбонатных породах, золоторудный в хрупких геологических образованиях, связанных с гранитоидами, и золото-серебряный в породах вулканоплутонических поясов.

Задача создания и расширения минерально-сырьевых баз стран и регионов связана не только с известными, разрабатываемыми и изучаемыми месторождениями, но и с потенциалом выявления новых. Прогнозная оценка рудоносности территорий и выявление в них новых месторождений полезных ископаемых остаётся одной из главных прикладных проблем современной геологии.

Не случайно вопрос о геологическом изучении закрытых территорий и поисков полезных ископаемых в их пределах, а также скрытого оруденения в известных рудных полях и районах начали широко обсуждаться учёными-геологами ещё на заре широкомасштабных геологических исследований территории бывшего СССР – на различных совещаниях, конференциях, научных сессиях в Алма-Ате (1958), Киеве (1960), Москве (1972) и т.д. Тогда же появились сборники научных исследований по фундаментальным проблемам прогнозирования эндогенных месторождений («Научные основы геохимических методов поисков глубокозалегающих рудных месторождений», 1971; «Основы научного прогноза месторождений...», 1971; «Основы научного прогноза месторождений твердых полезных ископаемых», 1971; «Прогнозирование скрытого оруденения...», 1972; «Научные основы геохимических методов поисков...», 1972; «Прогнозирование месторождений полезных ископаемых...», 1973; и др.).

Проблемам поисков глубокозалегающих месторождений уделяли большое внимание исследователи (Смирнов, 1955; Аристов, 1964, 1968, 1975; Сауков, 1963, Рахматуллаев, 1971; Иванкин, 1972; Хамрабаев, 1975; Соловов, 1980; Горжевский, 1980; Щербаков, 1980; Григорян, 1967, 1980, 1987; Овчинников, 1980, 1990; Барсуков и др. 1981; Каробейников, 2009; Ворошилов, 2011 и др., Скрыбин, 2017), а также крупные научные центры – в различных сборниках статей и тезисов (ИГИГ СО АН СССР, 1976; ИГЕМ, 1976; ИМГРЭ, 1976; ЦНИГРИ, 2019 и др.).

В начале тридцатых годов в бывшем СССР на основе теоретических положений В.И. Вернадского и А.Е. Ферсмана геологами-исследователями (Н.И. Сафронов и др., 1931) была начата разработка геохимических методов поисков рудных месторождений, на основе представлений об их вторичных ореолах, получивших затем широкое применение. Одновременно В.А. Соколов на основе тех же принципов предложил методы газовой съёмки для поисков месторождений нефти и газа. Научные основы этих методов были обобщены впоследствии Н.И. Гинзбургом, А.А. Сауковым и др.

Научный приоритет в создании геохимических методов и их практическом применении, принадлежащий СССР, признают за рубежом. Так, Х.Е. Хокс и Дж. С. Уэбб – крупнейшие зарубежные учёные в области прикладной геохимии – в предисловии к русскому изданию своей известной и переведённой на многие языки монографии «Геохимические методы поисков минеральных месторождений» указывают: «*Ранние теоретические исследования Ферсмана, Гольдшмидта и Вернадского легли в основу геохимических методов поисков минерального сырья, впервые разработанных и применённых советскими геологами более 30 лет назад, в годы, непосредственно предшествовавшие второй мировой войне. Статьи советских авторов, касающиеся этих ранних работ, явились первыми источниками, на основе которых проводились первые исследования в*

области геохимических методов поисков Геологической службы США в 1947 г. и Горно-геологического отдела Королевского горнотехнического училища в Лондоне в 1947 г.» [3].

Значительные успехи в применении геохимических методов за прошедшие годы в поисковых и разведочных работах на рудных месторождениях обусловлены разработкой учёными-геохимиками научных основ этих методов по следующим направлениям:

- исследование вторичных геохимических ореолов рассеяния элементов-индикаторов с целью разработки методов выделения перспективных участков и поиски в их пределах рудных тел и месторождений, обычно вскрытых эрозионной поверхностью (крупномасштабные поиски по вторичным литохимическим ореолам рассеяния элементов-индикаторов);
- изучение первичных геохимических ореолов для разработки методики поисков месторождений, не выходящих на дневную поверхность, и слабоэродированных рудопроявлений и месторождений;
- изучение наложенных эпигенетических ореолов рассеяния элементов-индикаторов с целью разработки методики поисков погребенных рудных тел и месторождений;
- разработка методов определения масштаба оруденения исходя из параметров геохимических аномалий.

На решение этих задач были направлены глубокие научные исследования, связанные с именами А.П. Соловова, Л.Н. Овчинникова, А.А. Беуса, С.В. Григоряна, А.И. Перельмана, Е.М. Квятковского, Э.Н. Баранова, В.И. Поликарповкина, Л.В. Таусона, А.А. Кременецкого, В.И. Морозова, В.М. Питулько, П.А. Удотова, А.М. Спиридонова и др. Из зарубежных исследователей значительный вклад в совершенствование геохимических методов поисков внесли N.L. Darnes, F.M. Cameron, R.W. Boyle, J.S. Webb, P.P. Bryks и др. [4].

Применение комплекса геохимических методов в области поисков рудных месторождений, со времён создания геохимических методов до настоящего времени, совершенствуясь и дополняясь на протяжении 90 лет, с самого начала показало высокую эффективность, несмотря на низкую чувствительность применявшихся ранее методов анализа проб. Задача создания научных основ геохимических методов, методических основ, разработка технических средств, лабораторной базы, компьютерных программ по обработке геохимической информации в мировом масштабе была успешно решена – результаты отражены во многих опубликованных источниках.

Вместе с тем, в последние годы особое значение начинают приобретать геохимические методы, позволяющие выявлять месторождения, не выходящие на дневную поверхность, так как, по мнению геологов-практиков, почти все выходящие на дневную поверхность средние и крупные месторождения основных видов металлических полезных ископаемых, особенно расположенные в относительно освоенных горнорудных районах, выявлены. Это объясняется тем, что в первый длительный период изучения открывались рудные тела, непосредственно выходящие на поверхность в виде коренных обнажений и первичных ореолов рассеяния или вторичных ореолов.

Геохимические методы поисков месторождений, не выходящих на дневную поверхность, и применяемые при этом методы и технологии на новом этапе требуют решения новых задач, основными из которых, по мнению [4] и дополненные нашими представлениями, являются:

- разработка теоретических основ формирования аномальных геохимических объектов ранга рудных районов, узлов и полей. В настоящее время детально обследован механизм образования и разработана методика количественной

- оценки первичных и вторичных ореолов на уровне рудных тел и месторождений. Для более крупных подразделений эти вопросы находятся в стадии разработки. Актуальность их решения определяется необходимостью выявления новых рудных районов и узлов в процессе средне- и мелкомасштабных исследований;
- дальнейшая разработка теоретических основ, совершенствование методических приемов, широкое использование и разработка более прецизионных мобильных технических средств, используемых в полевых условиях для выявления труднооткрываемых, не выходящих на дневную поверхность месторождений;
 - дальнейшее совершенствование аналитической базы. Постановка задачи выявления слабопроявленного, не выходящего на дневную поверхность оруденения диктует необходимость широкого внедрения высокоточных и экспрессных аналитических методик, прежде всего ICP MS, оборудования для анализа различных газов, а также специальных методик селективного анализа;
 - совершенствование методики и качества проведения полевых геохимических работ с целью повышения их эффективности;
 - совершенствование методов интерпретации аномальных геохимических полей, в увязке комплекса геолого-геофизических и космоструктурных данных с результатами топоминералогического картирования, изучения полей метасоматитов, с учетом ландшафтно-геохимической обстановки проведения работ;
 - широкое использование и совершенствование компьютерных технологий и статистической обработки геохимических данных в построении специализированных карт, в том числе прогнозных, в создании геолого-геохимических моделей разного ранга, а также подсчёте прогнозных ресурсов.

На обширных территориях, при большом разнообразии геологических условий, определяющих закономерности размещения и особенности оруденения, конкретные задачи и методы геолого-структурного и металлогенического картирования для прогнозов и поисков оруденения, не выходящего на поверхность, могут быть весьма различны [10].

К настоящему времени накоплен обширный фактический материал по закономерностям размещения и условиям образования месторождений, который используется для целей прогнозирования. Однако простое увеличение степени геологической изученности территорий и детальности поисковых работ в последнее время, как правило, не приводит к соответствующему увеличению числа открытий новых рудных месторождений. Это в свою очередь порождает проблему разработки новых методических приёмов, новых более чувствительных и представительных аппаратных комплексов, приборов и технологий.

На основе многолетнего опыта геологоразведочных работ по изучению скрытого и перекрытого оруденения определилась необходимость их более детального подразделения, так как выявилось наличие множества видов так называемых «слепых» рудопроявлений, поиски и разведка которых требовали учёта их особенностей.

Не всегда однозначный смысл вкладывают геологи в термин «*закрытые территории*», к которым в одних случаях относятся площади с мощными покровами рыхлых элювиально-делювиальных образований, в других – области, в которых древнее кристаллическое или складчатое основание перекрыто более молодыми осадочными и (или) вулканическими породами, и т. д. В практике геологического картирования закрытыми уже многие десятилетия считаются районы с мощностью рыхлых отложений свыше 10 м, и этот показатель до сих пор не пересматривался.

Разделение закрытых территорий по структурно-тектоническому принципу представляет непростую задачу. Есть территории простого одноярусного и сложного (двух и более) ярусного строения. Каждая из этих групп может быть подразделена в зависимости от установленного или предполагаемого наличия полезных ископаемых в породах фундамента и покрова на следующие подгруппы:

- 1) с полезными ископаемыми только в фундаменте;
- 2) с полезными ископаемыми только в покрове;
- 3) с полезными ископаемыми и в фундаменте, и в покрове.

Далее и они могут быть подразделены на более мелкие по различным признакам (морфология, горно-геологические условия, глубина залегания, доступность для изучения и т. д.).

Подразделение скрытых месторождений производится по признакам положения рудных тел относительно современного или древнего эрозионного среза, по наличию или отсутствию перекрывающих поверхность среза более молодых отложений и по глубине залегания рудопроявлений.

Эти и другие особенности проблематики терминологии скрытого оруденения в целом были рассмотрены еще в далёкие 60–70-е годы прошлого века. Для месторождений и рудных тел, расположенных на глубине, вместо общего устаревшего термина «слепые», который не отражает полностью суть вопроса, предложен объединяющий их общий термин – *«месторождения, не выходящие на поверхность»*.

С тех пор прошло много времени и в мире накопился колоссальный опыт по методике, технологии и техническим средствам поисков скрытых, не выходящих на поверхность месторождений.

К рассматриваемой проблеме, особенно в части рудоносности закрытых территорий, уже многие годы проявляет большой интерес геологическая общественность Узбекистана, об этом свидетельствуют опубликованные в периодической печати материалы. Первые обобщения по золотоносности закрытых территорий района сделаны Х.Р. Рахматуллаевым в 1971 году.

Одним из первых крупных обобщений стала коллективная монография «золотоносность закрытых территорий Узбекистана» (1975) под общей редакцией И.Х. Хамрабаева, в которой определены общие задачи и принципы построения прогнозно-металлогенических карт на золото на закрытых площадях Узбекистана. Первые, более полные данные о глубинном геологическом строении домезозойского фундамента закрытых территорий Узбекистана содержатся в работах М.А. Ахмеджанова, О.М. Борисова, И.А. Фузайлова (1967); М.А. Ахмеджанова и др. (1971); Х.У. Узакова и др. (1970, 1972). Магматические и постмагматические образования в домезозойском фундаменте закрытых территорий впервые (более подробно) изучены Х.Р. Рахматуллаевым и И.Х. Хамрабаевым по кернам скважин на площади центральных и южных Кызылкумов и отчасти юго-восточного Приаралья. В результате подтверждено наличие магматических комплексов, аналогичных выявленным на открытых территориях Западного Узбекистана и установлено (Хамрабаев, 1958; Хамрабаев, Рахматуллаев и др., 1969) продолжение ранее выделенных рудных поясов под мезокайнозойскими отложениями [8].

В монографии впервые даны подробные биогеохимические, гидрогеохимические признаки, оценка информативности геофизических полей и геофизические признаки оценки перспектив территорий на золотое оруденение. Также даны рекомендации о возможности использования совокупности геолого-геофизических и минералого-геохимических признаков для выявления и оценки золотоносности закрытых и полузакрытых площадей.

Как итоговый результат, составлены прогнозные карты эндогенного золотого оруденения закрытых и полужакрытых территорий Узбекистана, что дало значительное ускорение реализации задачи изучения их золотоносности (рудноносности).

Сведения о геохимической изученности и геохимических особенностях ряда рудных объектов Узбекистана, детальный анализ их результативности и оценка применимости геохимических методов выявления месторождений, не выходящих на дневную поверхность (*в том числе для закрытых территорий*) приведены в ряде отечественных монографий: Д.С. Мукимовой (1987), Р.М. Талипова (1988), Э.Б. Бертмана (1990), А.Д. Джураева и М.М. Пирназарова (1991), М.М. Пирназарова и С.М. Колосковой (2007), В.Ф. Скрыбина и др. (2017) и др.

Кроме того, более чем 50-тилетнее изучение геологического материала, накопленного в результате исследования перекрытого мезокайнозойскими отложениями палеозойского фундамента закрытых территорий Узбекистана (Узаков, 2013), показало, что в их геологическом строении участвуют практически те же структурно-вещественные комплексы (СВК), что и в открытой части. При этом соотношения СВК тоже схожие, крупных различий в геологическом строении не установлено, есть некоторые различия в соотношении между СВК по отдельным регионам, что, вероятнее всего, может предопределять и схожие перспективы рудоносности.

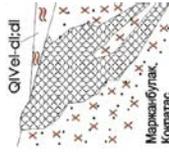
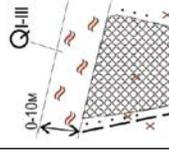
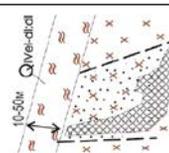
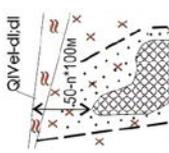
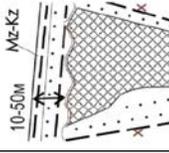
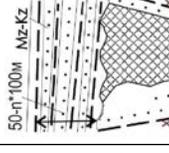
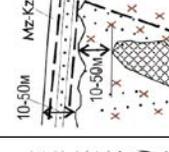
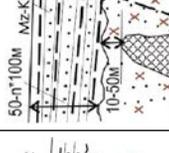
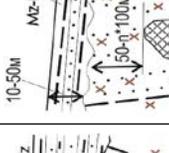
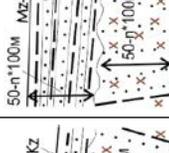
Представленная ниже табл. 1 – результат обобщения наших ранних работ [12, 16, 17], опубликованной литературы и некоторых фондовых материалов по изучению скрытых месторождений различных видов полезных ископаемых. В таблице использованы нечасто употребляемые, но достаточно устоявшиеся на практике термины, обозначающие конкретные горно-геологические условия размещения месторождения. Детальность, с которой представлены многовариантные условия пространственного размещения месторождений полезных ископаемых, вызвана необходимостью выбора в дальнейшем соответствующего комплекса методов исследования и технических средств.

Когда речь идёт о потенциале скрытых и перекрытых месторождений, то следует вспомнить об одной из закономерностей статистической металлогении – о вертикальном распределении запасов месторождений (Усманов, 1996): *«по характеру плотности вертикального распределения крупных эндогенных рудных, в частности полиметаллических, объектов Центральной Азии, ресурсы крупных скрытых объектов, размещённых ниже гипсометрической отметки +200 м, оцениваются приблизительно равной их ресурсам выше этого уровня и больше ресурсов известных объектов»* [18].

При такой постановке вопроса ресурсы скрытых (ещё невыявленных) месторождений равны или даже больше, чем выявленных, а тех, которые находятся на закрытых территориях, залегающих в погребенном и скрыто-погребенном состоянии, также не меньше, чем в открытых территориях, а значит, в целом, невыявленные ресурсы месторождений в сумме в три раза больше чем то, что мы имеем сейчас. Применительно к золоту, например, невыявленные запасы оцениваются в несколько тысяч – первые десятки тысяч тонн. Такой потенциал, даже без учёта других металлов, предполагает, что как открытые, так и закрытые площади ещё многие годы будут объектом прогнозных, поисковых и разведочных работ.

Большая часть территории Узбекистана изучена геохимическими методами съемки масштабов 1:500 000–1:200 000. Горно-возвышенные части Узбекистана практически покрыты литохимическими съемками по вторичным ореолам масштаба 1:50 000, но методически хорошим и удовлетворительным качественным уровням оценки соответствуют лишь 40 % выполненных в различные годы работ. Недостаточной

Таблица 1
Горно-геологические условия залегания месторождений металлических полезных ископаемых

Открытые площади		Закрытые площади	
Мощности рыхлого покрова		Мощности рыхлого покрова	
0 – 10 м		10 м – n-100 м	
Месторождения, выходящие на поверхность		Месторождения, не выходящие на поверхность современного эрозионного среза	
Месторождения, не обнаженные современным эрозионным срезом, полностью заключенные в толще вмещающих пород. Месторождения этой группы залегают в породах фундамента	Месторождения, не вскрытые современным эрозионным срезом, заключенные в толще вмещающих пород. Они залегают либо в фундаменте, либо в толще покрова, либо в породах покрова и фундамента одновременно	Месторождения, обнажившиеся древним эрозионным срезом, а затем погребенные под более молодыми геологическими образованиями	Месторождения, расположенные ниже древней эрозионной поверхности, перекрытой более молодыми геологическими образованиями
Вскрытые эрозией месторождения	Скрытые месторождения	Скрыто-погребенные месторождения	
Условия залегания месторождений		варианты залегания	
Скальные выходы (не перекрытые)	Частично или слабо перекрытые рыхлым покровом	Глубоко скрытые	Глубоко скрытые
0 м	0 – 10 м	10 – 50 м	50 – n-100 м
 Марсабулак, Копатас, Кзылсай, Гуаушай, Учудун, Якоче, Иниче, Устарсай, Рывак, Чули, Мурнтау, Кальмасыр, Серьичу	 Кочбулак (вост. фланг), Гужумсай, Балантау, Амантайтау	 Каульди, Сагынкан, Карамурун	 Кульчулак, Наугискен, Койташ (уч. Угат), Ингичи
		 Аржибугут, Колчиқтау, Охактош	 Северный Амантайтау, Чукурудук
		 Саутбай, Сарытау	 Сапын
		 Кызата	 ...

и неравномерной является изученность территории республики эндо-, био-, атмо- и гидрогеохимическими методами, которые только в отдельных горнорудных районах (Султанувайский, Букантауский, Тамдытауский, Южно-Нуратинский) достигают 20–50 %. Качественно-методический уровень этих съемок, исходя из современных требований, различен, особенно он низок на I этапе развития геохимических исследований (1951–1962 гг.), о чем свидетельствуют результаты контрольно-заверочных работ, по которым хорошими и удовлетворительными признаны геохимические съемки только на 60 % открытой территории [5, 11,12,17].

Нами также неоднократно (Пирназаров, Турамурастов и др. 2003; Турамурастов, 2007; Турамурастов и др. 2008, 2010) затронуты проблемы выявления труднообнаруживаемого оруденения, результативности геохимических исследований, геохимических особенностей отдельных месторождений, а также вопросы применения геохимических методов при прогнозировании эндогенного оруденения в Узбекистане.

Основной целью этих публикаций был обзор современного состояния геохимических работ, оценка их результативности. Кроме того, на основе накопленного материала были обобщены ландшафтные условия проведения геохимических исследований, структурно-тектонические условия размещения месторождений, влияющих на выбор геохимических методов поисков [12, 16, 17].

Анализ материалов показывает, что в Узбекистане потенциальные возможности геохимических методов до конца еще не раскрыты в силу относительно слабой, неравномерной геохимической изученности территории республики, которая весьма и явно отстает от геологического изучения, которое, в свою очередь, имеет некоторые недостатки. Отсюда возникает необходимость геохимических пересъемок на новой методической основе с целью исследования рудного потенциала площадей, в т. ч. и на оруденение нетрадиционных типов как на открытых, так и закрытых площадях [12, 16].

Один только общеизвестный факт – в Узбекистане не установлены предельные глубины распространения рудных тел или залежей ни на одном крупном месторождении золота, если не учитывать недавно начатые работы по изучению перспектив глубоких, неизученных горизонтов одного медно-порфирового и нескольких золоторудных месторождений.

Отсутствие таких планомерных работ по разным объективным и субъективным причинам, в свою очередь, сильно тормозит изучение вертикальной геохимической зональности месторождений, которая является главным инструментом при прогнозировании глубинных перспектив месторождений.

Выявление ресурсов на перекрытых территориях требует применения специфических методов и технических средств.

Необходима серьезная подготовка к проведению исследований, так как перекрытые чехлом молодых осадочных образований (от 10 м и более) занимают площади до 85 % территории республики, особенно в пределах бескрайних Центральных Кызылкумов, в обрамлениях Нуратинских, Зирабулак-Зияятдинских, Каратюбинских гор. С точки зрения изучения потенциала их рудоносности, являются относительно белым пятном для геологов-поисковиков – геологическая изученность их слабая, объём картировочных скважин, вскрывших полностью осадочный чехол и достигших фундамента и полученная из них информация недостаточны для составления уверенного представления о геологическом строении и потенциале рудоносности.

Для геохимических исследований необходимо применение технических средств – аппаратуры для отбора проб, проведения элементных и компонентных анализов

непосредственно в полевых условиях и в стационарных лабораториях вкуче с аппаратурой, проводящей замеры физических полей.

Общеизвестно, что при разработке, испытании и внедрении новых геохимических методов и в особенности испытании технических средств геохимических поисков территория Узбекистана, начиная с 50–60 годов прошлого века, служила одним из главных геологических полигонов.

Наиболее крупным обобщением результатов геохимических исследований, опыта применённых методов, аппаратуры и задач геохимических поисков рудных месторождений в Узбекистане за долгий, 60 с лишним лет (с 50–60-х годов прошлого века до настоящего времени) срок, стала монография высокопрофессиональных авторов [11].

Основные результаты этого обобщения – достаточно подробный анализ результативности большого количества применённых методов геохимических поисков, аппаратуры и аналитических методов с привязкой к геолого-ландшафтным условиям. Определена применимость тех или иных геохимических методов для выявления скрытых на глубине месторождений полезных ископаемых. Не вдаваясь глубоко в описание результатов этой работы (она доступна свободно на интернет-ресурсах), возьмём так называемые «работающие» методы и поместим их в соответствующие ячейки таблицы, отражающие горно-геологические условия залегания месторождений полезных ископаемых (табл. 2).

За последние годы разработано достаточно много новых методов (технологий) поисков месторождений, инновационных геохимических и геофизических методов и аппаратуры для поисков месторождений, прошедших достаточно успешные испытания в различных геолого-ландшафтных обстановках. Более подробно об этом можно прочитать в многочисленных опубликованных источниках [1, 2, 13, 14, 19, 20, 21, 23, 25 и др.], информационных бюллетенях и на интернет-ресурсах.

Даже самое краткое описание принципов работы этих методов и возможностей составит большую по объёму брошюру. Поэтому в рамках этой статьи кратко перечислим некоторые из них, которые дают общие представления о зарекомендовавших себя широко применяемых и о новых методах и технологиях. Вместе с тем, здесь не рассматриваем аппаратное обеспечение, т. к. о нем также много написано в общедоступных ресурсах.

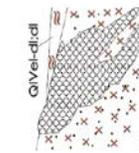
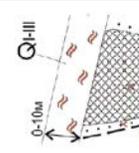
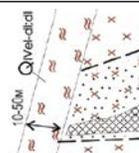
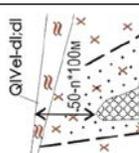
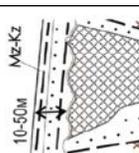
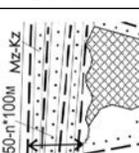
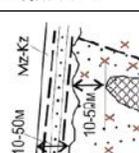
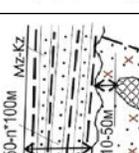
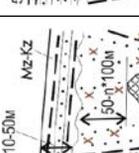
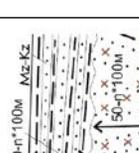
В табл. 2, результирующей данной статьи, приведена вся совокупность разнообразных горно-геологических и ландшафтных условий проведения геологических исследований со строгой их классификацией (в видении автора) в увязке со сведениями о методах изучения, применяемых для выявления оруденения, не выходящего на поверхность, которые уже апробированы, и о результативно «работающих» геохимических методах.

В таблицу также помещены «работающие» геологические, геофизические, космогеологические, а также некоторые современные инновационные методы, применяемые для поисков месторождений, не выходящих на поверхность.

Ниже также кратко рассмотрим характеристики комплекса методов, которые уже доказали свою эффективность при поисках месторождений полезных ископаемых, особо уделяя внимание их глубинной разрешающей способности.

Из **геологических методов** наиболее эффективными, по признанию многих специалистов, являются методы картирования. Обобщение накопленного опыта работ на открытых и прилегающих закрытых территориях приводит к необходимости применения комплекса методов геологических исследований, испытанных и ранее не применённых аппаратных комплексов, отличающихся высокой воспроизводимостью

Таблица 2 Горно-геологические и ландшафтные условия размещения месторождений полезных ископаемых и соответствующие им геологические, геофизические, геохимические и др. методы поисков

Открытые площади		Закрытые площади									
Мощности рыхлого покрова		Мощности рыхлого покрова перекрывающего месторождения, не выходящие на поверхность, влияющие на выбор метода изучения									
Группы месторождений		Месторождения, не выходящие на поверхность современного эрозионного среза									
Условия глубинности залегания месторождений	Вскрытые эрозией месторождения	Скрытые месторождения		Погребённые месторождения		Погребённые месторождения		Скрыто-погребённые месторождения		Скрыто-погребённые месторождения	
		варианты залегания		варианты залегания		варианты залегания		варианты залегания		варианты залегания	
Скальные выходы (не перекрытые)	Частично или слабо перекрытые рыхлым покровом	Не глубоко скрытые	Глубоко скрытые	Мелко погребённые	Глубоко погребённые	Не глубоко скрытые, мелко погребённые	Не глубоко скрытые, мелко погребённые	Глубоко скрытые, мелко погребённые	Не глубоко скрытые, мелко погребённые	Глубоко скрытые, мелко погребённые	Глубоко скрытые, мелко погребённые
0 м	0 – 10 м	10 – 50 м	50 – n – 100 м	10 – 50 м	50 – n – 100 м	10 – 50 м / 10 – 50 м	10 – 50 м / 10 – 50 м	10 – 50 м / 50 – n – 100 м	10 – 50 м / 50 – n – 100 м	50 – n – 100 м / 10 – 50 м	50 – n – 100 м / 50 – n – 100 м
 Маржаубулак, Колкитас, Кызылтан, Гулаусай, Рудук, Инчице, Устрасай, Муроту, Кольмаюр, Сарычуку	 Кочублак (вост. фланг), Гужумсай, Баллантау, Амантайтау	 Каульди, Сагынкан, Карамурун	 Куль-чулак, Наугискен, Койгаш (уч.Угет), Ингичи	 Аджибуут, Колкитас, Оақташ	 Северный Амантайтау, Чукурудук	 Саутбай, Сарытау	 Салын	 Кызата	 ...		
Геологические	МК*, ГПК, ГССК CSS, СТ	МК, ГПК, ГССК CSS, СТ	МК, ГПК, ГССК CSS, СТ	МК, ГПК, ГССК CSS, СТ	МК, ГПК, ГССК CSS, СТ	МК, ГПК, ГССК CSS, СТ	МК, ГПК, ГССК CSS, СТ	МК, ГПК, ГССК CSS, СТ	МК, ГПК, ГССК CSS, СТ	МК, ГПК, ГССК CSS, СТ	МК, ГПК, ГССК CSS, СТ
Геофизические	ГРС, ММ, ГМ, CR, IP, АЭМ, АММ, АГСМ, АГСМ, МСР	ГРС, ММ, ГМ, CR, ERT, АЭМ, АММ, АГСМ, VLF, IP, МСР	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ
Геохимические	МАСФ, МГХК	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ	МАСФ, МГХК, РМ, ЧИМ, МДИ, МПФ, ТМГМ, NAMEG, ММИ
Другие	АКГИ	АКГИ	АКГИ	АКГИ	АКГИ	АКГИ	АКГИ	АКГИ	АКГИ	АКГИ	АКГИ
Методы изучения											

* – расшифровка сокращений приведена ниже по тексту, где дана характеристика различным методам изучения

и чувствительностью, с целью выявления перспектив закрытых территорий ещё на самых ранних стадиях изучения.

Ведущую роль при этом, по общему признанию, должно играть старое, доброе глубинное-геологическое, точнее, геолого-металлогеническое картирование, которое с течением времени сначала трансформировалось в прогнозно-металлогеническое, а затем в **минерагеническое картирование (МК)**, которое использует целый арсенал методов геолого-геохимического, геофизического и космогеологического изучения закрытых территорий. Все другие виды исследований служат для получения фактического материала, используемого при составлении геологических и минерагенических карт.

В качестве итоговых документов региональных **прогнозно-минерагенических работ** масштабов 1:200 000 (100 000) – 1:50 000 (1:25 000) выступают минерагенические и прогнозные карты, составленные в масштабе исследований. Минерагеническая карта отражает закономерности размещения месторождений полезных ископаемых. Она приобретает статус прогнозно-минерагенической карты, если снабжена накладкой прогноза оруденения того же масштаба. В этом случае прогноз завершается расчетом прогнозных ресурсов категории P_2 .

Глубинное геологическое картирование (ГГК) выполняется в масштабах 1:50 000 – 1:25 000 на территориях с погребенным складчатым фундаментом при наличии продуктивной толщи внутри покровного чехла и с глубоко залегающими перспективными горизонтами в рудных зонах и полях. ГГК обычно специализировано на определенный круг полезных ископаемых. Главной задачей его является выявление участков, перспективных на определенный тип полезного ископаемого, а также определение вероятности нахождения промышленного месторождения на каждом из таких участков до намеченной глубины. После проведения ГГК по каждому из выявленных перспективных участков разрабатываются рекомендации для дальнейших поисков и устанавливается очередность опосискования. Учитывается полученная оценка вероятности обнаружения месторождения. Прогнозные ресурсы подсчитываются по категориям P_2 и P_1 . Высокая стоимость поисковых работ (*за счет бурения колонковых скважин*) на закрытых территориях и, следовательно, высокая цена ошибки прогноза обуславливает высокие требования к точности и достоверности прогноза при ГГК [9].

Глубинность изучения зависит от поставленной задачи и может составить, при разных мощностях перекрывающего комплекса отложений, до 1 км. Более глубинные разрезы изучаются исходя из результатов проведенных глубинных исследований для отображения регионального геологического строения.

В этом контексте напрашивается желание на первое место поставить ОГК – объёмное геологическое картирование, являющееся самым совершенным геологическим методом, но вследствие его дороговизны и трудности организации исследований, в настоящее время метод практически не применяется.

В ходе проведения полевых исследований обязательно возникнет вопрос **изучения вещественного состава** – определение минералогических и петрографических характеристик изучаемых геологических образований, в особенности рудных образований, гидротермальных изменений, что требует наличия целого ряда вспомогательных технических средств. Среди них: отрезные, шлифовальные, полировальные станки для подготовки шлифов и аншлифов, микроскопы (с автодетекцией) минералогические и петрографические, различные расходные материалы к ним. Производителей такого оборудования великое множество: Chennai Metco, Sinercon, Buehler, Scientific и др.

Из **геохимических методов** наиболее результативными и продвинутыми являются следующие методы (технологии):

- **метод анализа сверхтонкой фракции (МАСФ;** разработан ВСЕГЕИ, 2006) – разновидность литогеохимических методов поисков по вторичным ореолам и потокам рассеяния с анализом сверхтонкой фракции рыхлых отложений. Сущность МАСФ заключается в выделении из проб рыхлых отложений сверхтонкой фракции (<10 мкм) с последующим переводом в раствор сорбционно-солевых форм нахождения элементов и их анализом количественными методами (*AES ICP, MS ICP, AAA и др.*), иногда в сочетании с полуколичественным эмиссионным спектральным анализом. При применении МАСФ по вторичным ореолам обычно опробуются иллювиальный горизонт почвенного разреза или подпочвенный горизонт, при поисках по потокам рассеяния – донные отложения постоянных и временных водотоков. МАСФ может применяться в самых разных масштабах – от 1:1000 000 до 1:10 000 (1:5 000). Метод в основном используется на относительно открытых территориях [13, 14, 7];
- **многоцелевое геохимическое картирование (МГХК;** разработан ИМГРЭ, 1995) – в основе своей использует метод выявления наложенных солевых ореолов в приповерхностной почве и нацелено на решение следующих основных задач: оценка природных региональных геохимических фонов по картируемым компонентам (коренные горные породы, почвы, кора выветривания, донные отложения, воды и др.); получение геохимических характеристик геологических комплексов и уточнение их границ для повышения достоверности и прогностических свойств Государственных геологических карт; уточнение границ известных и выявление новых минерагенических объектов в ранге районов и узлов, определение их рудно-формационной принадлежности и оценка по геохимическим данным их прогнозных ресурсов по категории P_2 и металлогенического потенциала. Метод в основном используется на открытых территориях;
- **атмохимический (газовый) метод** поисков месторождений полезных ископаемых основан на исследовании подземной атмосферы и ее приземного слоя – химического состава газов, насыщающих горные породы – *углекислого газа, углерода, метана, сероводорода, сернистого газа, паров ртути, азота, гелия, радона, аргона, сернистой ртути, хлора, фтора, брома, йода и т. д.* Важное практическое значение при поисках погребенных месторождений полезных ископаемых имеет большая проникающая способность газовых компонентов, мигрирующих на значительные расстояния от рудных тел через перекрывающие толщи рыхлых отложений. Это очень важно в случаях проведения геохимических исследований на перекрытых территориях. Атмохимические поиски в целом являются косвенными, однако тщательный анализ физико-химических условий образования газовых ореолов часто дает достаточные основания для уверенной геологической интерпретации выявленных аномалий и установления связи с месторождениями. Этот метод в основном используется как на открытых, так и на закрытых (перекрытых) территориях;
- **ртутнометрический метод (РМ)** – пожалуй, самый известный из всех атмохимических методов. Благодаря естественному процессу «дыхания» рудных месторождений, от их рождения и до полного их разрушения, над рудными телами образуются газортутные ореолы рассеяния во вмещающих породах, подпочвенной, почвенной и приземной атмосфере. Газовые ореолы рассеяния могут возникать и при «рождении» месторождений, но, главным образом, они формируются при последующих вторичных физико-химических и биологических процессах,

происходящих в рудных телах, месторождениях и их первичных ореолах. Следовательно, над месторождениями любого генезиса, содержащими аномальные количества ртути, могут формироваться газортутные ореолы рассеяния. Концентрирование ртути характерно не только для рудных, но и для нефтяных, газовых месторождений. Поисковая геохимическая значимость этого явления весьма существенна, так как концентрирование проявляется не только в повышенных содержаниях в рудных телах, но и в форме литохимических и газовых ореолов рассеяния. Метод может быть применен в различных ландшафтных обстановках при поисках рудных месторождений, выведенных на древнюю денудационную поверхность и перекрытых рыхлыми мезокайнозойскими отложениями мощностью от 20–100 до 500 м. Глубинность газортутного метода при поисках медных и свинцово-цинковых месторождений достигает 350 м, ртутных и сурьмяных – 400 м;

- **геоэлектрохимический метод** применяется для изучения ореолов рассеяния подвижных форм нахождения химических элементов и связанных с ними вторично закрепленных форм. Метод основан на изучении различных форм нахождения химических элементов в отобранных пробах. Из области повышенных концентраций подвижных форм химических элементов (вокруг залежи полезного ископаемого) происходит перемещение вверх простых и комплексных ионов в составе струйных ореолов рассеяния. Вблизи дневной поверхности химические элементы продолжают существовать в подвижных формах нахождения или переходят в слабозакрепленное или вторично закрепленное состояние, сорбируясь на органических комплексах, железомарганцевых соединениях или глинистых частицах почв. Селективный анализ форм нахождения конкретных химических элементов в конечном счёте даёт эффект глубинности метода. Этот метод в основном используется как на открытых, так и на закрытых (перекрытых) территориях.

Разработано несколько модификаций геоэлектрохимических методов:

- *частичное извлечение металлов* – **ЧИМ** (Софронов, 1971). В этом методе извлечение ионов металлов происходит под действием постоянного электрического тока в подкисленную воду, залитую в пористый сосуд, установленный в рыхлый приповерхностный слой пород. Метод ЧИМ направлен на извлечение наиболее подвижных форм нахождения химических элементов, которые можно определить как электроподвижные. Дальнейшее его развитие привело к формированию различных продвинутых модификаций, в том числе за рубежом – в США и Китае (Hoover et al., 1997; Leinz, et al., 1998). За рубежом его называют СЧИМ (Chastichnoe Izvlechennye Metallov), видимо, из уважения и активно, результативно применяется на площадях, перекрытых чехлом рыхлых отложений мощностью 100–150 м;
- *метод диффузионного извлечения* – **МДИ** (Алексеев и др., 1989). Извлечение металлов из сорбированных форм нахождения выполняется с использованием процессов десорбции в слабый раствор кислоты и диффузии под действием градиента концентрации [1];
- *метод металлоорганических почвенных форм* – **МПФ** (Антропова, 1971). Сущность метода заключается в определении концентрации элементов, взаимодействующих с природными фульво- и гуминовыми кислотами почв. Извлечение органических кислот из отобранных проб производится под воздействием водного раствора пиродифосфата натрия [2];

- *терромагнитный геохимический метод* – **ТМГМ** (Ворошилов, 1973). Метод основан на исследовании закономерностей распределения химических элементов, связанных с гидроокислами железа и марганца в почвах – этот феномен является архиважным в геохимии почв, и современные исследователи серьёзно обращают внимание на него и тщательно изучают. Созданы различные модификации этого метода. Основой ТМГМ является упомянутая ранее теория о дальнем перемещении с глубины химических элементов в легкоподвижных формах нахождения с последующим закреплением и накоплением на путях транспортировки и вблизи дневной поверхности при взаимодействии их с железо- и марганецсодержащими минералами. В состав работ ТМГМ входят: полевой отбор проб, их магнетизирующий обжиг с выделением терромагнитной фракции с помощью магнита; анализ фракции на содержание элементов-индикаторов и измерение магнитной восприимчивости пробы до и после обжига. Метод, при соблюдении технологии, является информативным для глубокозалегающих скрытых, перекрытых и скрыто-перекрытых месторождений [6].
- *йодометрический метод* – **ИМ**. Использование йода как геохимического индикатора было предложено еще в 70-е годы прошлого века (Сафронов, 1963; Соловов, 1966). Йод мигрирует с поровой и капиллярной влагой, образует диффузионные и инфильтрационные ореолы. Сорбируется в основном глинистыми минералами и органикой. В настоящее время метод продвигается коллективом кафедры МПИ Российского университета дружбы народов (РУДН) для поисков месторождений металлических полезных ископаемых, залегающих в скрытом положении. Сообщается, что ореолы йода указывают на оруденение, залегающее на глубине более 250–300 м, иногда при полном отсутствии позитивной информации по рудным элементам [10, 15]. Метод широкого распространения пока не имеет.

За рубежом методы изучения ореолов повышенных концентраций подвижных форм отдельно не выделяют, применяют под общим названием «геоэлектрохимические методы». Однако там существуют методы изучения так называемых «изменившихся под действием глубинных источников» физико-химических свойств, приповерхностных отложений [19, 20] и подвижных и вторично-закреплённых форм нахождения элементов [21, 22, 23].

Основными методами, применяемыми за рубежом, являются:

- *метод NAMEG (NAnoscale MEtals in EarthGas)* – **наноразмерные металлы в земных газах**, в котором используют анализ газовой составляющей верхнего слоя рыхлых отложений (Китай);
- *метод MOMEО (MOBile forms of MEtals in Overburden)* – **мобильные формы металлов в рыхлом покрове**, в котором используют извлечение из почвенных проб различных групп мобильных форм нахождения элементов: водорастворимых, элементоорганических, адсорбированных форм и ионно-обменного комплекса (Китай).

Развиваются новые инновационные технологии, основанные на подвижных ионах, например, технология **ММІ** (подвижные металлические ионы):

- *метод ММІ (MOBile Metal Ions)* – **мобильные ионы металлов**, в котором используют выделение и анализ мобильных ионов металлов из проб рыхлого покрова (Австралия, Канада и др.). Продвигается компанией SGS (Канада). Метод представляет собой инновационный аналитический процесс, использующий уникальный подход к анализу металлов в почве и сопутствующих материалах.

Целевые элементы извлекаются с помощью слабых растворов органических и неорганических соединений, в отличие от традиционных агрессивных смесей, содержащих кислоты или цианид. Решения ММІ содержат сильнодействующие лиганды, отделяющие и удерживающие в водном растворе ионы металла, которые были свободно связаны с частицами почвы слабыми атомными силами. Подобный метод извлечения не растворяет связанные формы ионов металла. Поскольку эти подвижные, свободно связанные комплексы находятся в очень низких концентрациях, измерение проводится традиционным методом ICP-MS.

Эти методы в основном используются как на открытых, так и на закрытых (перекрытых) территориях. Существует множество других специфических геохимических методов – биогеохимический, геоботанический, изотопный и т. д., которые также совершенствуются постоянно.

Вопрос эффективности проведения геохимических исследований тесно сопряжён с аналитической базой, которая должна быть прецизионной с одной стороны и мобильной с другой. Техничко-технологическая база (масс-спектрометрия) постоянно совершенствуется, достигнуты требуемые пределы чувствительности – по 60–70 элементам возможно 100 % количественное определение на уровне 10^{-8} – 10^{-12} грамм. Одновременно совершенствуются полевые спектрометры, основанные на принципе рентгенофлуоресценции (XRF), в том числе ручные полевые, которые приобретают всё большую популярность у полевых геологов. Их преимущества – получение мгновенных измерений содержаний элементов непосредственно в поле с приемлемой чувствительностью. В геологической отрасли подобной аналитической аппаратурой успешно пользуются много лет и накоплен достаточный опыт.

Геофизические методы относятся наиболее распространённым методам при поисках месторождений, а их методическое и аппаратное обеспечение постоянно совершенствуется. Ниже представлен общий обзор различных геофизических методов, наиболее информативных при поисках оруденения, не выходящего на поверхность, на основе информации из [25] и из некоторых других интернет-источников:

- *магнитометрические (ММ) и гравиметрические (ГМ)* методы ныне проводятся высокочувствительным оборудованием, являются самыми распространёнными геофизическими методами и не нуждаются в рекламе. Но при этом, исходя из опыта работ, наибольший эффект информативности достигается тогда, когда они комплексуются с другими геофизическими методами, такими, как:

- *метод удельных электрических сопротивлений* постоянного тока и *томография удельного электрического сопротивления (ERT – Electrical Resistivity Tomography)*; глубина разрешения до 50–70 м;
- *индуцированная (вызванная) поляризация*, IP во временной области и комплексное удельное сопротивление (IP, TDIP, CR). Удельное сопротивление и вызванная поляризация (ВП) – известные методы геофизической разведки. Дают ценную информацию о разломах, трещинах, геологических структурах, минерализации и пористости горизонтов подземных вод. Расстояние между парой токовых электродов и парой электродов потенциального поля определяет глубину исследования. Съёмки ВП могут проводиться в качестве продолжения исследований CSEM или CSAMT (в которых также используется индуцированный контролируемый источник электроэнергии для измерения магнитотеллурических полей);
- *электромагнетизм с управляемым источником (CSEM – Controlled Source ElectroMagnetism) и аудиочастотная магнито-теллурика (CSAMT – Controlled Source Audio Frequency Magnetotellurics)*. ЭМ с контролируемым источником

- (CSEM) – это метод наземной геофизической съемки, который используется при разведке полезных ископаемых, геотермальных источников и подземных вод, а в некоторых случаях – углеводородов. Предоставляет критически важную информацию о геологической структуре, литологии, уровнях грунтовых вод и солёности флюидов. Глубина: CSEM / CSAMT применим для отображения диапазона глубин от 20 до 1000 метров;
- *комплексное удельное сопротивление (CR – Complex Resistivity)*, также известное как *Spectral IP*, представляет собой многочастотный метод IP, разработанный Кеннетом Зонге в начале 1970-х годов в качестве средства различения аномальных откликов при съемке, происходящих от геологических изменений и от сульфидов. Наведенная поляризация (IP) является мерой задержанной реакции напряжения в породах Земли. Эффект IP вызван индуцированной током реакцией переноса электронов между ионами электролита и минералами, измерением способности Земли накапливать электрическую энергию. Глубина порядка 100–150 м;
 - *магнитотеллурические (MT и AMT) методы* геофизических исследований. Магнитотеллурика (MT) и аудиочастотная MT (AMT) – методы электромагнитной съемки и визуализации, в которых используются естественные ионосферные токовые слои и грозы – пассивные источники энергии. MT-съемки обычно используются для исследования глубоких структур. Способность идентифицировать геологические объекты с помощью этого метода зависит от глубины, размера цели, результирующих контрастов удельного сопротивления и их геометрии. Глубина: для картирования геологических структур на глубине 500 метров и более. Некоторые разновидности магнитотеллурических методов имеют глубинность в несколько десятков километров;
 - *переходная электромагнитная или временная ЭМ (TEM – Transient (temporary) ElectroMagnetic)* – основные разновидности нестационарного электромагнитного поля (ПЭМ), также называемый ЭМ во временной области (TDEM) или импульсный ЭМ (PEM); является широко используемым геофизическим методом для получения данных об удельном сопротивлении-проводимости пород. Методы ПЭМ использовались при разведке полезных ископаемых, инженерии и экологических исследованиях. Глубина исследования может варьироваться от десятков метров до более чем 1000 метров (от 30 до 3000 футов) в зависимости от размера используемого контура передатчика, доступной мощности передатчика и окружающих электромагнитных помех;
 - *методы очень низких частот (VLF – Very Low Frequency method)*. В этих методах съёмки используются очень низкочастотные сигналы радиосвязи (ОНЧ) для определения электрических свойств неглубоких коренных пород и приповерхностных грунтов, в первую очередь в качестве разведывательного инструмента. Профили VLF могут быть выполнены быстро и недорого для выявления аномальных областей, требующих дальнейшего изучения с помощью других съемок, бурения или отбора проб. Этот метод особенно полезен для картирования крутопадающих структур, таких, как разломы, трещины и неглубокие участки потенциального оруденения. Глубина исследования колеблется от 4–5 метров в проводящих грунтах до 40–60 метров в высокоомных грунтах;
 - *сейсмические методы – анализ поверхностных волн (SASW – Spectral Analysis of Surface Wave или MASW – Multichannel Analysis of Surface Waves)*. Удар кувалдой или механическим устройством порождает дисперсионные волны, которые

распространяются по поверхности земли по аналогии с океанскими волнами. Определяются глубина проникновения и механические свойства (скорость поперечной волны) материалов непосредственно под точкой наблюдения. Глубина исследования – верхние 30 метров;

- *сейсмическое зондирование, сейсмическое продольное и непродольное профилирование в модификациях МПВ (КМПВ) – (корреляционный) метод продольных волн, МОВ – метод отражённых волн, ОГТ – общая глубинная точка и др.* Эти методы применяются для решения задач определения рельефа кровли скальных и мощности перекрывающих их нескальных грунтов и коры выветривания, расчленение разреза скальных и дисперсных пород на слои различного литологического состава; обнаружение и оконтуривание зон повышенной трещиноватости, тектонических нарушений, активных разрывных структур; литолого-петрографического состава и изучение напряженного состояния пород. Глубина исследований изменяется в широких пределах – от $n \cdot 10$ до $n \cdot 1000$ м. Для целей наших исследований вполне достаточен предел глубинности $n \cdot 100$ м; У этих методов есть и малоуглубинные модификации – *многоканальная микросейсморазведка (ММСР)*, глубинность уверенной расшифровки которой составляет порядка 50–150 м, в зависимости от геологического разреза;
- *наземная георадарная съёмка (ГРС)* позволяет получить картину толщи массива, например, грунта, в котором, подобно рентгеновскому снимку, по насыщенности окраса можно судить об увлажнённости, наличии промывов, полостей, формировании оползневых процессов и провалов, выявлять зоны повышенной трещиноватости, что актуально при поиске полезных ископаемых, определять монолитность массива. ГРС служит вспомогательным методом в геофизических исследованиях и изучении опасных геологических процессов, выявлении глубин залегания подземных вод и полостей. Глубина информативности: большинство георадаров «видят» до 20 метров, есть сообщения о просвечивании глубин на 50 и даже до 100 м;
- *спектральное сканирование керна – ССК (CSS – Core Spectral Scanning)*. Метод реализован на основе детекторов типа RS-125/RS-230 и предназначен для определения содержания урана, тория и калия в керне или образцах. Работа проводится в условиях керносклада;
- *гиперспектральное сканирование керна (ГССК) методом HSCLS – (Hyper Spectral Core Logger System)*. Проводится сканером SisuSCS в составе рабочей станции SisuROCK или типа Geotek MSCL-S (Standard Multi-Sensor Core Logger) – стандартным мультисенсорным сканером керна, позволяющим изучать керн в автоматическом режиме. Сканер предназначен для исследования бурового керна, это суперсовременная рабочая станция анализа бурового керна. Можно получать данные из сотни ящиков с керном горных пород в день без какой-либо подготовки проб. Полученные гиперспектральные данные могут быть преобразованы в последовательные и объективные геологические карты (разрезы) по буровой скважине. Далее эта же информация используется для получения прямой идентификации минералов из спектров. Комплектуется разными сканерами для автоматического определения разных групп минералов, может комплектоваться и другими датчиками и приборами. Это устройство может оснащаться дополнительными детекторами, такими, как XRF-анализатор, приборами акустического каротажа, гамма-анализаторами, магнитометрами, радиометрами, приборами для изучения электрических свойств и др.;

- *керна томография – СТ (Core tomography)*. Это специализированные модели рентгеновского томографа для исследования полноразмерного керна. Основной конструкции томографа является принцип горизонтальной загрузки керна без его вращения во время сканирования. Исследование проводится за счёт вращения системы трубка-детектор вокруг образца, что позволяет избежать негативного влияния деформирующих сил на материал керна. Базовым исполнением рентгеновской системы является конфигурация с трубкой закрытого типа 150 кВ и детектором 250*200 мм. Она рассчитана на исследования стандартизованного керна длиной 1 м и диаметром до 100–110 мм.

Для каждого из вышеупомянутых геохимических и геофизических методов исследований известными мировыми компаниями разработаны различные, в том числе мобильные модификации аналитических приборов, измерительной аппаратуры, газоанализаторов, а в некоторых случаях разработана специальная методика приспособления для отбора и обработки проб (геохимических).

Одним их новых направлений является применение *аэрогеофизических исследований* для поисков и прогнозирования месторождений полезных ископаемых:

- *аэроэлектромагнитный метод (АЭМ)* – способ измерения искусственно созданного вторичного электромагнитного поля. Это метод прямых поисков твёрдых полезных ископаемых и является одной из эффективных технологий. Глубина исследования 300–400 м;
- *аэромагнитный метод (АММ)* – метод измерения магнитного поля Земли. Аэромагнитная съёмка проводится для тектонического районирования, геологического картирования интрузивов, вулканических построек, тектонических структур, регионального метоморфизма и поисков месторождений полезных ископаемых. Напрямую определяет рудные образования с высокой магнитной индукцией (магнетиты, титаномагнетиты). Глубина исследования зависит от многих факторов и примененной методики;
- *аэрогаммаспектрометрия (АГС)* изучает усредненные по площади содержания (спектры) радиоактивных элементов в приповерхностном слое горных пород и почв, прежде всего урана (радия), тория и калия. В основе интерпретации данных АГС лежат закономерности распределения радиоактивных элементов в горных породах, рудных полях и калия в метасоматически изменённых калишпатизированных породах.

Вышеперечисленные три аэрогеофизических метода внедрены в геологическую отрасль и успешно эксплуатируются.

К аэрогеофизическим методам относятся и геофизические исследования с применением беспилотных летательных аппаратов (дронов) – *АГИ БПЛА*. В связи с развитием компактных мобильных геофизических приборов (*магнитометров, градиентометров, электроразведочной аппаратуры и даже спектрометрических – от MS-50 до MS-1000/2000UAS, являющихся малыми аналогами АГСМ-аппаратуры весом от 1 до 12 кг*) стало возможным установка их на дроны, тем самым значительно упростилось проведение геофизических исследований, радарных, лидарных съёмок и аэрофото-методов. Методы обработки результатов этих исследований практически остались без изменений и привычны для геофизиков.

Совершенствование и разработка новых методов и аппаратного обеспечения (стационарных, мобильных, переносимых и БПЛА вариантов) для поисков месторождений полезных ископаемых, их апробация в различных ландшафтно-геологических условиях, создание программных продуктов для обработки их результатов в настоящее время

ведутся со стороны международных известных компаний, таких как: AGCOS, Chongqing Gold M & E Equipment Co.Ltd, GDD, GEM, GEOMETRICS, Geonics Ltd, Mobile Geophysical Technologies (MGT), AGICO, Radiation Solutions Inc, SatisGeo, Scintrex, Sensys, TerraPlus, Triumph, Zonge, Aarhus GeoSoftware, GeoSoft и многие другие.

Неотъемлемым приложением региональных работ является дешифрирование материалов аэрокосмической съемки (МАКС) – **аэрокосмогеологические исследования (АКГИ)**. Данный комплекс исследований в настоящее время составляет неотъемлемую часть региональных исследований и широко применяется. Материалами для работы в этих исследованиях служат данные радиолокационной (радарной) аэро- и космической съемки (цифровые фотографические материалы панхроматические и мультиспектральные, радиометрия, фотометрия и т. д.). Радарные снимки обеспечивают получение изображений земной поверхности и объектов, расположенных на ней, независимо от погодных условий, в дневное и ночное время, путем излучения и приёма отражённых от земной поверхности зондирующих сигналов с последующим преобразованием их в изображения или извлечением информации о разности фаз посланного и отражённого сигнала.

В данной статье мы ограничимся только кратким описанием состава работ (последовательно) при проведении средне-крупномасштабных АКГИ:

- подготовка материалов аэро- и космических съемок, топогеодезических работ для дальнейшего дешифрирования (компьютерного). Сбор, обобщение и анализ имеющегося геолого-геофизического материала по району;
- дешифрирование, в том числе крупномасштабное, по изучаемому району в масштабе 1:100 000–1:50 000 (1:25 000) с целью уточнения геологического, тектонического и неотектонического строения территории, выделения линейных и дугообразных линеаментов трещинно-разрывных структур осадочного чехла и фундамента, установление их природы, их роли в формировании рудных формаций и месторождений;
- морфоструктурный анализ линеаментов и мегатрещиноватости для построения неотектонической карты на структурно-блоковой основе;
- комплексная интерпретация результатов АКГИ с накопленным геолого-геофизическим материалом, составление отчета и результирующих цифровых карт в требуемых форматах.

Завершая обзор, следует сказать о том, что какие бы “вызовы” ни возникали на разных этапах развития геологии, творческая мысль геологов, геофизиков, инженеров-конструкторов, программистов адекватно реагирует, создаются различные технические средства для помощи геологу, облегчения и повышения эффективности его работы. А дело геолога – правильно ими пользоваться.

Для более полного использования опыта проведенных и производимых работ по поискам оруденения, не выходящего на поверхность, целесообразно периодически освещать их общее состояние, основываясь на обзорах накопленных материалов.

Одна из попыток подобного обобщения представлена в настоящей статье; основная ее задача – стремление показать необходимость изучения оруденения, не выходящего на поверхность, и для этого использовать комплекс различных методов геологического изучения, в особенности целесообразно применять всю совокупность геологических, методических, аппаратно-программных и аналитических комплексов.

Теоретическая база геологии, прикладной геохимии и геофизики, информация и опыт, накопленный в республике за многие годы геологических, геохимических, геофизических и космогеологических исследований, позволяет, с учетом целей и задач геологоразведочных работ, варьировать методическими приемами и определять оптимальные

комплексы геологических исследований. Основанием для этого утверждения служат накопленные в Узбекистане за более чем за 70-тилетнюю историю работ геологические материалы, охватывающие практически все горнорудные районы, а также разветвленная методико-аналитическая база, созданный научный и кадровый потенциал.

Реализация задачи поисков оруденения, не выходящего на поверхность, увязывается с острой необходимостью соответствующего технического перевооружения и модернизации отрасли современными методическими, технологическими, техническими и аналитическими средствами.

Выводы

- 1) На ближних предгорных территориях, где перекрывающие отложения имеют небольшие мощности (до 50 м), степень изученности геохимическими методами поисков (~60 % из них хорошего и удовлетворительного качества) приграничных открытых территорий позволяют надеяться здесь на высокую эффективность дальнейших исследований. Обнаруженные опытным путем над скрытыми и перекрытыми (30–50 м, редко более) оруденениями ряда рудных месторождений Западного и Восточного Узбекистана мультипликативные и моноэлементные ореолы золота, ртути, мышьяка, свинца, молибдена и др. свидетельствуют о проницаемости пород осадочного чехла для восходящих флюидов, содержащих растворенные ионы металлов.
- 2) Около 10–12 % территории Узбекистана закрыта Mz-Kz осадками мощностью до 200 м и находится в пределах возможностей многих геохимических и геофизических методов; проведение геохимических исследований в комплексе с геологическими, геофизическими, космогеологическими методами на таких площадях является первоочередной (*следом за открытой частью*) задачей для детальных исследований.
- 3) Большие глубины домезозойского фундамента (≥ 200 м), с его многочисленными водонепроницаемыми экранами, развитием осадочных пород высокой пластичности, залечивающих зоны глубинных разломов, разнообразие типов вторичных геохимических ореолов рассеяния и геохимических барьеров для большинства имеющихся дистанционных геохимических и геофизических методов поисков являются непреодолимыми. Но и эти территории нельзя сбрасывать со счетов – их нужно изучать имеющимися методико-техническими возможностями и подготавливать для детального изучения в будущем, когда будут разработаны соответствующие методики и аппаратура.
- 4) В рассматриваемых условиях для поиска оруденения, не выходящего на поверхность, наиболее оптимальными методами являются проведение поисков по вторичным наложенным ореолам рассеяния при рациональном сочетании геоэлектрохимических, атмохимических, глубинных литохимических, геофизических, геологических (космогеологических) методов. Выявленные ореолы должны быть интерпретированы с учетом результатов ранее проведенных геолого-геохимических и геофизических исследований рыхлого покрова и структурных особенностей первичного фундамента.
- 5) Основным препятствием в развитии геохимических поисков является недостаточно полная изученность коэффициентов соответствия первичных содержаний химических элементов в различных ландшафтно-геохимических условиях с вторичными лито-, био-, гидро- и атмохимическими. Это мешает использовать в практике детально проработанные по эндогенным (первичным) ореолам закономерности размещения уровней максимальных концентраций

химических элементов относительно скрытых рудных тел, предварительно устанавливая их рудно-формационную принадлежность, применять мультипликативные оценочные коэффициенты зональности и подсчет прогнозных ресурсов. Что, в свою очередь, обуславливает необходимость постановки на перспективных объектах опытно-методических работ и усиления исследований для разработки теоретических основ поисков различными методами не выходящих на поверхность перекрытых отложениями Mz-Kz рудных месторождений как эндогенного, так и экзогенного происхождения.

- 6) Организация работ по поискам месторождений увязывается с решением главного вопроса – комплексного технического обеспечения методов поисков, то есть приобретения соответствующих аппаратуры, приборов, лабораторного оборудования, с организацией обучения специалистов, проведением опытных работ по отработке и оттачиванию технологий на конкретных ландшафтных и горно-геологических условиях – одним словом, провести большой, сложный комплекс подготовительных работ.

Все это, с учетом современных требований, технологического обеспечения, накопленного опыта и практической подготовки специалистов позволит осуществлять прогнозно-поисковые работы с целью выявления новых рудных месторождений, не выходящих на поверхность, практически в любых геолого-ландшафтных условиях республики.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Алексеев С.Г., Духанин А.С. Диффузионное извлечение подвижных форм нахождения металлов для поисков скрытого оруденения // Геохимические методы и научно-технический прогресс в геологическом изучении недр. М.: Наука, 1989. С.174–178.
- 2) Антропова Л.В. Формы нахождения золота в горных породах / Л.В. Антропова, А.З. Шуралева, Л.Ф. Фарфель // Методика и техника разведки. Л., ВИТР, 1980, № 136. С. 5–21.
- 3) Барсуков В.Л., Григорян С.В., Овчинников Л.Н. Геохимические методы поисков рудных месторождений. М.: Наука, 1981. 325 с.
- 4) Буланов В.А., Сасим С.А. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых // 2-е изд., доп. М.: Изд. ЮРАЙТ, 2019. 165 стр.
- 5) Джураев А.Д., Скрыбин В.Ф. Эффективность геохимических поисков в Узбекистане. Сб. Прикладная геохимия, вып. 3. Прогноз и поиски., М.: ИМГРЭ, 2002. С. 449–471.
- 6) Ворошилов Н.А., Ворошилова Л.Н. Применение терромагнитного геохимического метода (ТМГМ) при поисках рудных месторождений. В сб. «Методы интерпретации результатов литохимических поисков». М.: Наука, 1987. С. 135–141.
- 7) Временные методические указания по проведению геохимических поисков на закрытых и полужакрытых территориях / С.В. Соколов, А.Г. Марченко, С.С. Шевченко и др. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2005. 98 с.
- 8) Золотоносность закрытых территорий Узбекистана // Отв. ред. академик И.Х. Хамрабаев. Ташкент. Изд-во «ФАН», 1975. 236 с.
- 9) Литвин П.А., Рыбаков М.В., Сахновский М.Л. и др. Глубинное геологическое картирование (Методическое пособие по геологической съемке масштаба 1:50 000, вып. 7). – Л.: Недра, 1981. 280 с.
- 10) Соловов А.П., Архипов А.Я., Бугров В.А. и др. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых // М.: Недра, 1990. 335 с.
- 11) Скрыбин В.Ф., Диваев Ф.К., Пирназаров М.М. Геохимические поиски рудных месторожде-

- ний в Узбекистане: общие сведения, опыт применения, задачи и пути их решения, рекомендации // Гл. ред. И.Б.Турамуратов; Госкомгеологии РУз., Госпредприятие «Научно-исследовательский институт минеральных ресурсов». Т.: ГП «НИИМР», 2017. 150 с.
- 12) Пирназаров М.М., Турамуратов И.Б., Жураев А.Ж., Мукимова Д.С. Роль геохимических методов поисков в повышении эффективности геологоразведочных работ // Институт минеральных ресурсов. Труды Международной научно-практической конференции «Проблемы рудных месторождений и повышения эффективности геологоразведочных работ» (21–24 октября 2003 г.). Ташкент, 2003. С. 369–372.
 - 13) Соколов С.В. Метод анализа сверхтонкой фракции: результаты, эффективность / С.В. Соколов, Ю.В. Макарова, Ю.Ю. Юрченко // Разведка и охрана недр, 2013. № 8. С. 54–58.
 - 14) Соколов С.В., Марченко А.Г., Макарова Ю.В. Геологическая эффективность геохимических поисков методом анализа сверхтонкой фракции // Разведка и охрана недр. 2008. № 4–5. С. 87–92.
 - 15) Трофимов Н.Н., Рычков А.И. Геохимические поиски рудных месторождений по газовым ореолам йода // Вестник РУДН, серия Инженерные исследования, 2010. № 1. С.45–50.
 - 16) Турамуратов И.Б., Жураев А.Ж., Скрябин В.Ф. Вторичные литохимические ореолы рассеяния и их роль в выявлении аномальных геохимических полей труднообнаруживаемого оруденения в Узбекистане // Прикладная геохимия. Вып. 8. М.: ИМГРЭ, 2008. С. 265–283.
 - 17) Турамуратов И.Б., Пирназаров М.М. Состояние геолого-геохимической изученности территории Узбекистана и перспективы применения геохимических методов при прогнозировании эндогенного оруденения // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Узгеоинновация 2010». Ташкент, 2010. С. 5–10.
 - 18) Усманов Ф.А. Статистический гипсометрический анализ. Распределение эндогенных рудных объектов Центральной Азии по вертикали // Узб. геол. журн. № 2, 1998.
 - 19) Govett J.S. Detection of deeply buried and blind sulphide deposits by measurement of Hand conductivity of closely spaced surface soil samples // Journal of Geochemical Exploration. 1976. № 6. P. 359–382.
 - 20) Hamilton S.M. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden: methodologies and field investigation at Marsh Zone gold property / S.M. Hamilton, E.M. Cameron, M.B. McClenaghan and G.E.M. Hall // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. 2004. № 4. P. 33–44.
 - 21) Hamilton S.M. Electrochemical mass transport in overburden: a new model to account for the formation of selective leach geochemical anomalies in glacial terrain // Journal of Geochemical Exploration. 1998. № 63. P. 155–172.
 - 22) Mark A.F. Results of Mobile Metal Ions Process (MMI-M) Soil Geochemical Surveys on the Marble Mountain Property of Cascadero Copper Corporation / A.F. Mark, P.E. Fedikow, R.K. Bezys // Sudbury Area, Ontario, Canada. 2012. 40 p.
 - 23) Mann A.W. Soil geochemical anomalies – their dynamic nature and interpretation / A.W. Mann, A.T. Mann, D.B. Humphreys, S.E. Dowling, S. Staltari, L. Myers // Minerals and Energy Research Institute of Western Australia. 1997. Report, V.1. 184 p.
 - 24) https://studylib.ru/doc/2500204/syr_evaya-baza-i-mirovoj-rynok-zolota.
 - 25) <http://zongec.com/geophysical-methods/>.

РОЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОСТОЧНО-КЫЗЫЛКУМСКОМ АРТЕЗИАНСКОМ БАССЕЙНЕ

Турсунметов Р.А., Гафуров Т.А., Ибрагимов А.С., Тё В.С., Хасанбаев Х.Ф.
 ГУ «Институт ГИДРОИНГЕО», г. Ташкент, Республика Узбекистан

В последние годы на Арнасайской площади был выявлен ряд ураноносных зон, граничащих с подземными водами, используемыми для водоснабжения поселков (рис. 1). В связи с этим, особый интерес представляет изучение особенностей миграции радионуклидов из ураноносной зоны по водоносным горизонтам. Вследствие этого, на первый план выдвигается выяснение гидрогеологических условий, определяющих возможности миграции радионуклидов. В дальнейшем основной задачей является прогнозирование миграции радионуклидов из ураноносной зоны при ее отработке [3, 4].

Рудоносная зона залегает в верхнемеловых отложениях (600–630 м), перекрытых палеогеновыми отложениями. Между этими горизонтами не всегда присутствуют отложения, которые могут служить водоупором.

В свою очередь, выше палеогеновых отложений лежат верхнеплиоценовый водоносный комплекс, водоносные комплексы среднечетвертичных, верхнечетвертичных отложений и водоносный горизонт современных отложений.

Особенность верхнеплиоценового водоносного горизонта заключается в том, что в северной части изучаемой площади вблизи рудных зон [1] фильтрационный поток подземных вод направлен в южном направлении, тогда как в южной части территории фильтрационный поток преимущественно имеет западное направление. В то же время водоносный горизонт является напорным и пьезометрический уровень достигает 15–16 м от поверхности земли [5]. На рис. 2 представлено распределение пьезоуровня среднечетвертичного водоносного горизонта на рассматриваемой территории.

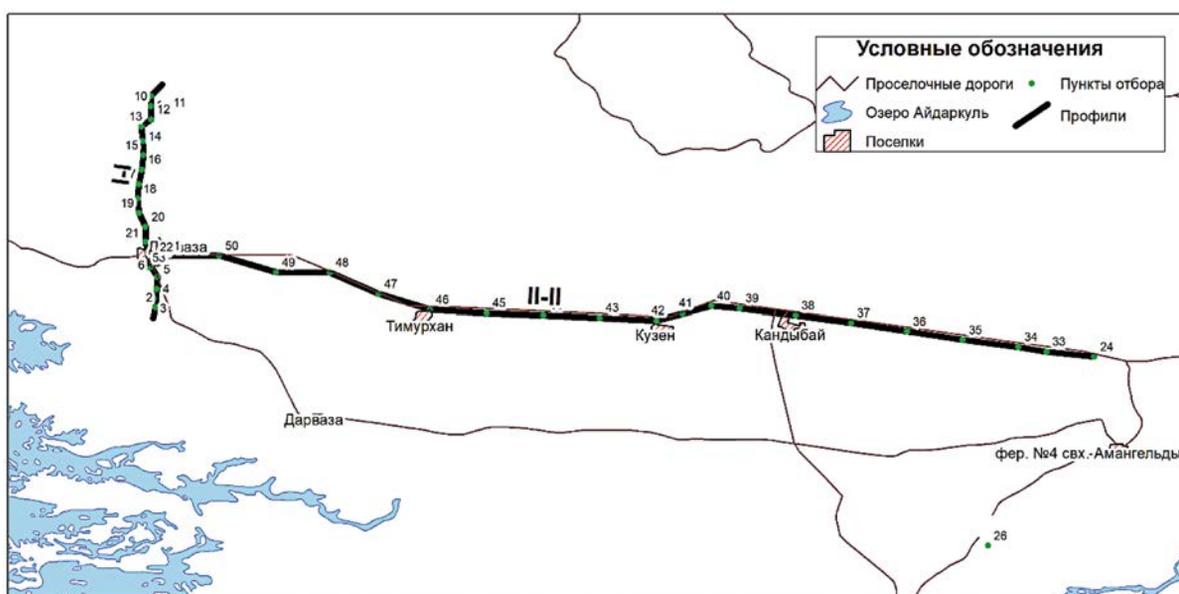


Рисунок 1. Карта фактического материала исследуемой территории

Водоносный комплекс среднечетвертичных отложений имеет такие же характеристики, как верхнеплиоценовый водоносный комплекс. Следует отметить, что при формировании водоносных горизонтов в южной части территории существенную роль сыграло развитие сырдарьинского потока с востока на запад. Таким образом формировались водоносные горизонты пресных подземных вод, так называемого Восточно-Кызылкумского артезианского бассейна (рис. 3).

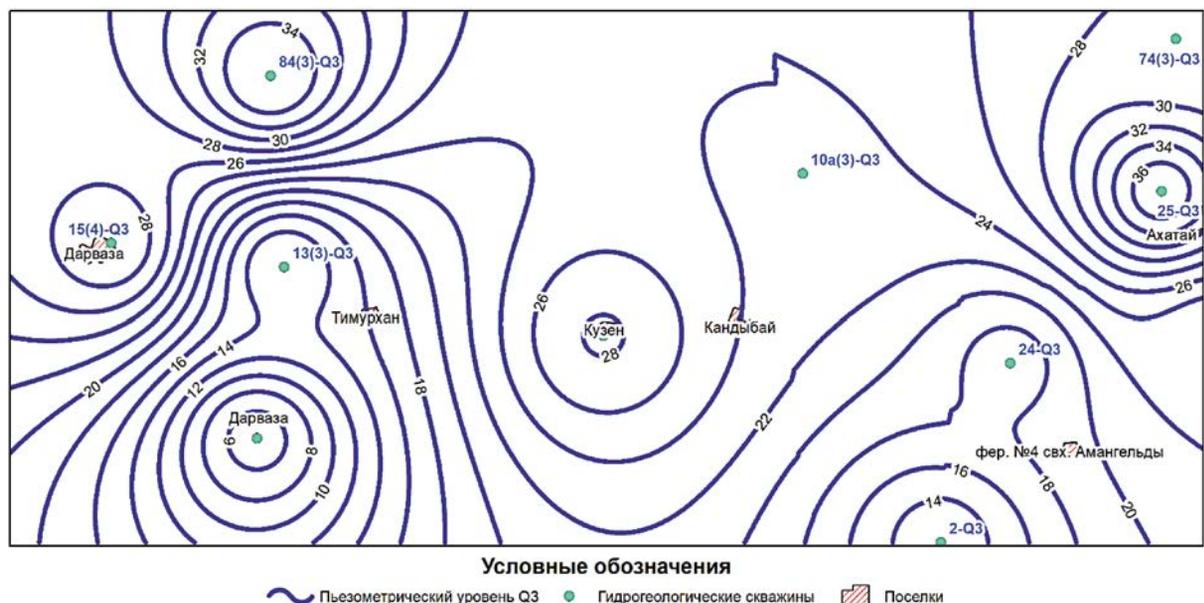


Рисунок 2. Пьезометрический уровень водоносного комплекса среднечетвертичных отложений

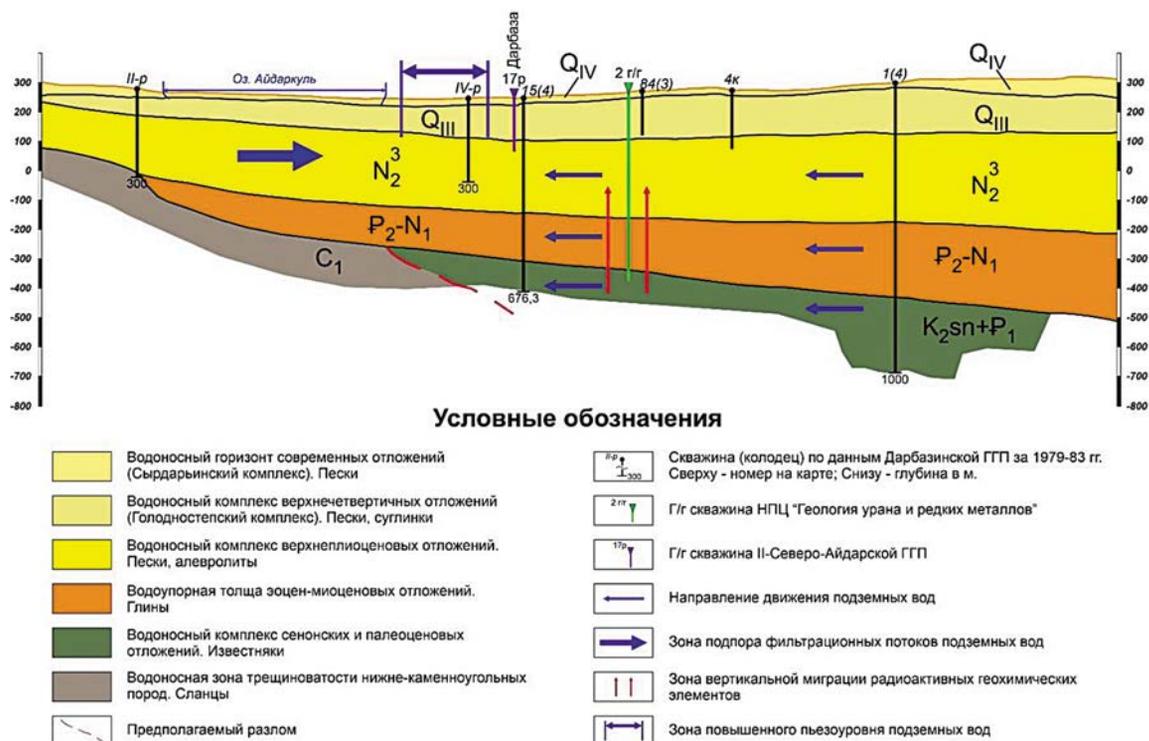


Рисунок 3. Гидрогеологический разрез по линии А-Б (по данным Халикулова М., Семёнова В.П. с дополнением авторов [6])

В целом для изучения взаимосвязи между озером Айдаркуль и Сырдарьинским комплексом были выполнены гидрогеологические наблюдения по створу II-II, состоящему из 3 скважин (№ № 4, 5, 6). Расстояние между скважинами № 4 и № 5 – 500 м, между № 5 и № 6 – 425 м. Анализировались результаты наблюдения глубины залегания грунтовых вод с 2014 г., и по этим данным было рассчитано значение уклона поверхности подземных вод между скв. № 4 и № 5, № 5 и № 6. Уклон между скв. № 4 и № 5 меньше, чем между № 5 и № 6, что свидетельствует о действии подпора водных потоков за счет выклинивания водоносных горизонтов с юга. Следует отметить, что подземные воды сырдарьинского комплекса разгружаются, то есть происходит отток подземных вод в сторону озер Айдаркуль и Арнасай [6].

На основе описанных гидрогеологических условий рассмотрим распределение радионуклидов по изучаемой территории [2]. Над ураноносными зонами развиваются физико-химические поля, токовые линии которых направлены вверх, что способствует миграции из глубины к поверхности земли. Результаты исследований почвенного слоя показывают, что вблизи рудной зоны наблюдается аномальное повышение содержания радона и интенсивности гамма-излучения (рис. 4).

В районе, где формируются пресные подземные воды в отложениях верхнего плиоцена, также наблюдается повышение интенсивности гамма-излучения и содержания радона. По нашему мнению, такое поведение этих компонентов связано с распределением пьезоуровней водонапорных горизонтов верхнеплиоценовых отложений. Таким образом, радионуклиды, мигрируя из рудоносной зоны в район формирования водонапорных горизонтов верхнеплиоценовых отложений, скапливаются за счет действия бародиффузии. В зоне скопления содержания урана выше, чем в подземных водах ураноносной зоны (рис. 4).

Также были отобраны пробы почв вдоль населенных пунктов Дарбаза, Кендибай и Темирхан, где пробурены скважины для питьевого водоснабжения, которые эксплуатируются в настоящее время. Отбор пресных подземных вод производился из плиоценовых отложений. Отметим, что указанные поселки расположены по саям*, которые имеют северное направление простирания. Саи являются аккумуляторами водных потоков, которые преимущественно направлены в сторону озера Айдаркуль. Следовательно, указанные саи отмечаются относительно повышенными значениями радона и гамма-активности.

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) Над урановым оруденением функционирует миграция радионуклидов и геохимических элементов благодаря тепло-бародиффузии.
- 2) Впоследствии радионуклиды и геохимические элементы мигрируют по всем существующим водоносным горизонтам. При этом, вследствие бародиффузии,
- 3) наблюдается локальное повышение концентрации указанных элементов в районе субнапорных водоносных горизонтов.
- 4) Указанный эффект также наблюдается в верхних горизонтах, о чем свидетельствуют аномальные изменения гамма-активности и содержания радона. Таким образом, система водонапорных горизонтов создает сквозные вертикальные миграционные каналы радионуклидов, от глубины до поверхности земли.
- 5) При создании мониторинга по наблюдению распространения радионуклидов необходимо учитывать своеобразие поведения в сложных гидродинамических условиях.

* Сай (тюрк.) – название в Среднеазиатском регионе ущелья, оврага, балки.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Албул С.П. Рудопоисковая гидрогеохимия. М.: Изд-во УДН, 1969. 343 с.
- 2) Бекман И.Н. Радиохимия. Том 4. Ядерная индустрия и промышленная радиохимия. Учебное пособие. Издательство ОНТОПРИНТ, 2013. 400 с.
- 3) Давыдов М.Г. и др. / Радиозкология: учебник для вузов. Ростов н/Д: Феникс, 2013. 635 с.
- 4) Ишханов Б.С./ Радиоактивность: учебное пособие. – М.: Университетская книга, 2011. 378 с.
- 5) Шестаков В.М. Гидрогеодинамика: учебник. М.: Изд-во КДУ, 2009. 334 с.
- 6) Тё В.С., Турсунметов Р.А. Изучение особенностей миграции радионуклидов из ураноносной зоны для создания радиозкологических исследований при добыче урана / Мат. XVI Междунар. научно-практич. конф. «Новые идеи в науках о Земле» (к 105-летию МГРИ) Т. 5: Развитие новых идей и тенденций в науках о Земле: Геоэкология и безопасность жизнедеятельности, математическое моделирование и разведочная геофизика, геоинформатика / Ред. коллегия: Ю.П. Панов, Ю.В. Зворыкина. М.: Издательство Российский Государственный Геологоразведочный Университет имени Серго Орджоникидзе, 2023. С. 189–192.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОКИСЛЕННЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕВЕРНОЕ (ЭЛЬКОНСКИЙ УРАНОВОРУДНЫЙ РАЙОН)

Цыпленко М.М.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

В линейных корах выветривания вблизи крутопадающих тектоно-метасоматических зон в пределах Эльконского урановорудного района отмечается окисление первичных руд урана, золота и серебра. В результате происходит высвобождение самородного тонкодисперсного золота, которые обнаруживается в породообразующих минералах (10–20 нм), а также вынос урана вследствие окисления браннерита. Золоторудная минерализация в приповерхностной части зоны приурочена не столько к главному шву, а в большей мере к оперяющим его структурам. В существенно окисленной приповерхностной зоне мощные золоторудные тела достигают 20 метров, однако при погружении субпараллельно главному шву они расщепляются и практически выклиниваются.

Непосредственно зона окисления имеет сложное строение: по редким зонам дробления она погружается до пятисот метров, однако и на дневной поверхности обнаруживаются участки слабоизменённых пород (рис. 1).

Наиболее интенсивная лимонитизация наблюдается вдоль оперяющих трещин склола; связи с трещинами отрыва, направленными перпендикулярно осевой зоне глубинного разлома, не установлено.

Для непосредственного разделения технологических руд на первичные, гипогенно- и, в различной степени, гипергенноокисленные породы и руды необходимы исследования по детальному минералогическому картированию с установлением однозначных единых критериев оконтуривания технологических типов.

Расчётами баланса вещества в эдукте и продукте метасоматоза при близком минеральном составе пары протерозойских кварц-полевошпатовых метасоматитов

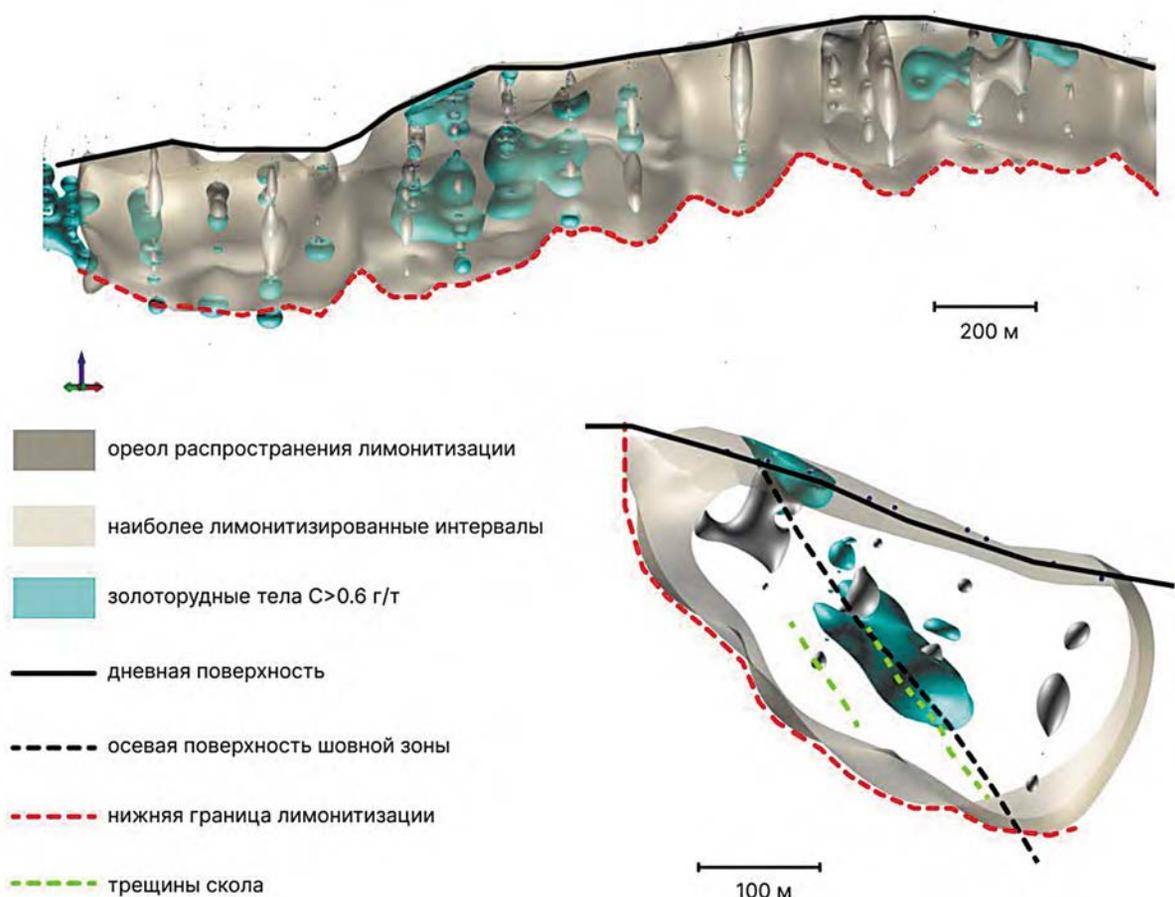


Рисунок 1. Продольный и поперечный разрезы, проведенные через окисленную зону Северного месторождения

и мезозойских адуляр-кварцевых метасоматитов не выявляется направленности и характера метасоматоза.

Для пород протолитов – гнейсов фёдоровской серии и протерозойских гранитоидов – в результате метасоматоза характерен вынос Si, Al, Mn, Na, Ca, причём окисное железо из гнейсов выносится, а в гранитоидах его привнос составляет свыше 2000 %. Также значительный прирост в метасоматитах, по сравнению с первичными породами, как для гнейсов, так и для гранитоидов, имеют Ti, Fe^{2+} , K, P, CO_2 [2].

При гипогенном окислении руд происходит разложение первичного браннерита на ряд вторичных продуктов: рутил, уранинит, анатаз и другие. Сульфидная минерализация при этом имеет свойство лишь частично гематитизироваться.

Гипергенное окисление, в свою очередь, проявляется в переходе железа из закисной в окисную форму, в выносе CaO, $CaCO_3$, MgO, V_2O_5 , CaF_2 , сульфидной серы. Зону гипергенного окисления можно условно оконтурить границами распространения лимонитизации; её интенсивность напрямую коррелируется с интенсивностью неотектонической проработки рудной зоны и вмещающих пород. Также условные границы устанавливаются по степени извлечения золота: для полуокисленных руд этот показатель составляет 50–80 %, для окисленных – свыше 80 %.

Изучение в шлифах окисленных пород и руд показало, что они представлены в различной степени лимонитизированными пирит-карбонат-калишпатовыми метасоматитами по гнейсам, гранито-гнейсам, а также продуктами брекчирования и катаклаза

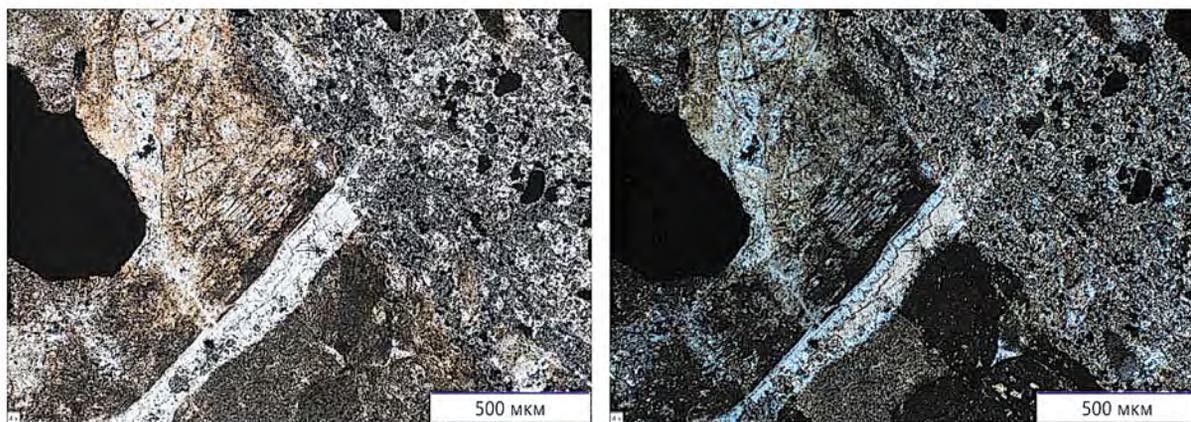


Рисунок 2. Брекчированный пирит-карбонат-калишпатовый метасоматит с крупной карбонат-кварцевой и более мелкой с зонально силикатно-карбонатной трещинами

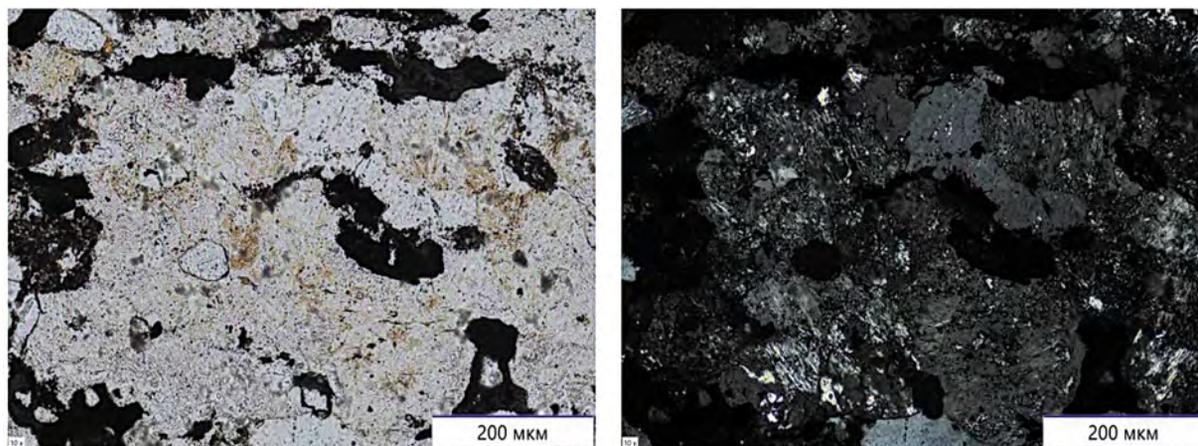


Рисунок 3. Пирит-карбонат-калишпатовый метасоматит с крупными выделениями пирита и изотропными сечениями циркона

метасоматитов. По минеральному составу преобладают калиевые полевые шпаты, кварц, плагиоклазы, карбонаты и хлорит (рис. 2).

Второстепенные минералы: глинистые минералы, слюды и другие. Из рудных минералов распространены пирит, магнетит, титаномagnetит. Из аксессуарных минералов значительно выделяются зёрна циркона (рис. 3).

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Тарханов А.В. и др. Новый тип уран-золотых месторождений в линейных корях выветривания на древних щитах на примере месторождения Северное (Алданский щит, Республика Саха (Якутия)) // Разведка и охрана недр. 2020. № 1. С. 14–19.
- 2) Терехов А.В. и др. Два типа рудоносных гумбеитов Эльконского золото-урановорудного узла (Южная Якутия) // Региональная геология и металлогения. 2014. № 60. С. 71–86.

РОЛЬ СТРУКТУРНОЙ ГЕОЛОГИИ В ПОИСКАХ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Читалин А.Ф.

ООО «Институт геотехнологий» (ИГТ), Москва

Введение

Геолого-структурный анализ – обязательный элемент работы геологов ИГТ при изучении рудных объектов на всех стадиях ГРП: геологическом таргетировании и прогнозировании, поисках, оценке и детальной разведке. Структурные исследования в комплексе с геохимическими и геофизическими методами служат основой для прогноза структурных ловушек и поисков скрытого (слепого и перекрытого) оруденения.

Методы и методология структурного анализа

Главным методом всегда был и остается полевой структурный анализ, позволяющий изучать структуру в натуре, выяснять соотношения структурных элементов и собирать фактический материал об их морфологии и кинематике. Полевые структурные методы используются при картировании структур разного масштаба на основе космо- и аэрофотоснимков; специалисты ИГТ также широко используют современные технические возможности беспилотных лидарных съемок и аэрофотосъемок для получения высокоточных детальных ортофотопланов. В поле выполняется объемная лидарная съемка обнажений – для уточнения структуры, ускорения сбора данных для анализа систем трещиноватости и построения трехмерных моделей изучаемых структур.

Полевые методы дополняются лабораторными методами структурного анализа: микроструктурными и минералогическими исследованиями, кинематической интерпретацией оптических узоров минералов и др.

Специалисты ИГТ также разрабатывают и используют методы компьютерной рентгеновской томографии (КТ) ориентированного керна и образцов для 3D-анализа минерализованных структур. Также КТ применяется для изучения динамического развития структуры зоны сдвига в аналоговых тектонофизических моделях (совместно со специалистами лаборатории тектонофизики геологического факультета МГУ).

При структурном анализе для цифрового картирования керна и геологических обнажений используется оригинальное ПО «GeoLog Assist» (разработка ИГТ, зарегистрировано в Роспатент в 2023 г.).

Вспомогательные методы, применяемые при структурных исследованиях:

- структурная интерпретация различных карт: геологических, геохимических, геофизических;
- экспертное геолого-структурное дешифрирование материалов ДЗЗ;
- автоматизированный линеаментный анализ материалов ДЗЗ, цифровой модели рельефа, «рельефных» геофизических карт, выполняемый с помощью широкораспространенного ПО «LESSA», а также более функционального ПО GeoTarget Lineaments+ (разработка ИГТ 2023 г., зарегистрировано в Роспатент в 2024 г.);
- автоматизированный спектральный анализ космоснимков и структурная интерпретация аномалий. Выделение мультиспектральных аномалий и их классификация выполняется с помощью оригинального многофункционального программного модуля SOVA (Spectral-Optical Vision Assistant для выделения спектральных аномалий по данным дистанционного зондирования Земли

(разработка ООО «ИГТ-Скай Групп», 2023 г., в настоящий момент проходит государственную регистрацию).

Тектонофизическое моделирование имеет важное значение для правильного понимания и интерпретации природных структур, помогает уточнить физические условия деформации, восстановить ориентировку осей сжатия и растяжения, тип и ранг поля напряжений, в котором формировалась структура. Это необходимо для обоснованного выделения этапов и стадий деформации в развитии изучаемой структуры, прогнозирования структурных ловушек рудной минерализации. Тектонофизика ограничивает необоснованные геологические интерпретации и фантазии рамками физических законов деформации твердого тела.

Итогом геолого-структурных исследований является выделение разновозрастных структурных и минерально-структурных парагенезов и создание структурной модели. Структурная модель служит основой комплексной генетической модели месторождения, ресурсной модели и прогнозно-поисковой модели. Прогноз рудных залежей базируется на определении величины структурного рудного шага, размеров, морфологии и кинематики структурных ловушек минерализации.

Тектонофизическая модель зоны разлома

При анализе разрывной тектоники нами используются представления о тектонофизической модели разлома (рис. 1), разработанной специалистами лаборатории тектонофизики Института Земной коры СО РАН в Иркутске [4, 5, 6, 14, 15].

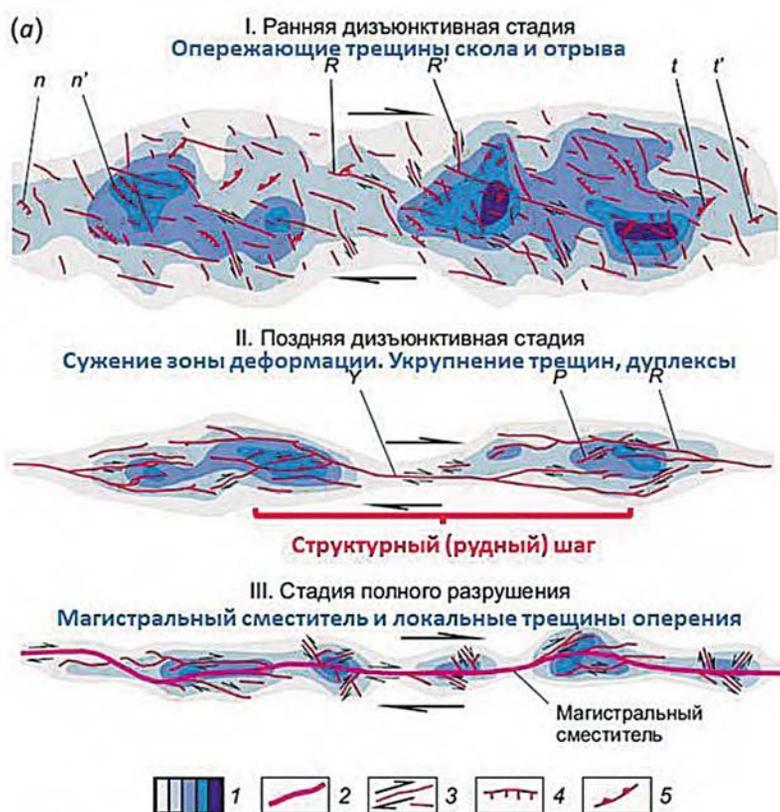


Рисунок 1. Тектонофизическая модель разломной зоны (на примере правого сдвига), по [6] с дополнениями: (a) – строение разломной зоны на трех главных стадиях развития: 1 – участки с различным количеством разрывов в единице площади; 2 – магистральный сместитель (разрыв 1-го порядка); 3–5 – сдвиги (3), сбросы (4) и надвиги (5) 2-го порядка. Латинские буквы – разнотипные разрывы 2-го порядка (n' , n , R' , R , t' , t , P) и магистральный сместитель 1-го порядка (Y)

В развитии разлома выделяется три стадии:

- 1) **на ранней дизъюнктивной стадии** формируется пояс трещиноватости – сколы и отрывы – так называемые **ОПЕРЕЖАЮЩИЕ РАЗРЫВЫ И ТРЕЩИНЫ**. Это известные всем «скрытые разломы»;
- 2) **на поздней дизъюнктивной стадии** область активной деформации сужается, формируются структурные узлы с высокой плотностью разрывов и трещин. При наличии рудной минерализации образуются рудные узлы. Они следуют с определенным структурным (рудным) шагом;
- 3) **на стадии полного разрушения** область активной деформации еще больше сужается и формируется **МАГИСТРАЛЬНЫЙ СМЕСТИТЕЛЬ, ШОВ РАЗЛОМА**, – его обычно и рисуют на геологических картах. На изгибах шва за счет трения образуются **разрывы оперения** (как правило, они небольшие по размерам).

Каждая стадия развития разлома может сопровождаться рудной минерализацией, могут сформироваться разновозрастные структурно-минералогические парагенезы.

Важно выявить корреляцию стадий развития рудной системы со стадиями развития разлома. Тектонофизический анализ обстановок локализации рудных полей и месторождений в разломных зонах позволяет существенно повысить эффективность геологоразведочных работ [7].

Тектонофизические модели зон сдвига, надвига и сброса принципиально не различаются. Все они характеризуются кулисным расположением опережающих и оперяющих разрывов, структурным шагом узлов их концентрации. Отличия заключаются в различной кинематике и в пространственной ориентировке этих трещин, формирующих структурные парагенезы, образовавшиеся в полях напряжений с различной ориентировкой осей растяжения и сжатия (сдвиговое, надвиговое и сбросовое поля напряжений). Это различие дает возможность определить кинематический тип разлома. Для целей прогнозирования структурных ловушек важно, что в зоне сдвига все разрывы кулисные в плане, а у надвига и сброса – кулисные в разрезе.

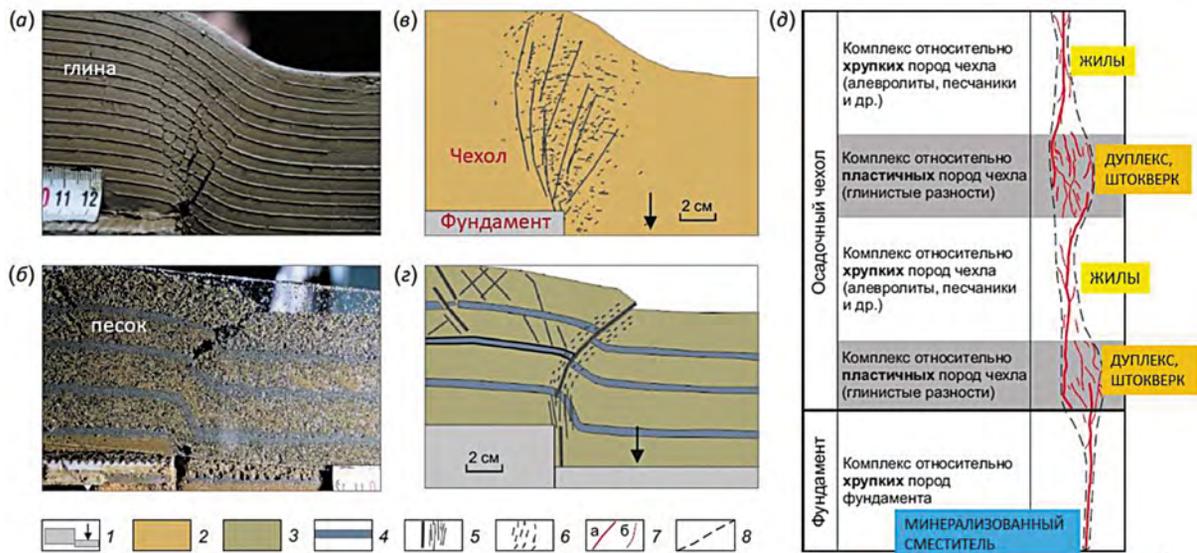
Структура разлома в породах разной компетентности может изменяться. В относительно хрупких породах разломная зона узкая, сместитель четко выражен, а в относительно пластичных породах зона разлома расширяется. Соответственно, структура разлома может изменяться по простиранию и на глубину, а при наличии минерализации могут чередоваться жилы и штокверки, а морфология рудных тел может быть различной (рис. 2).

Структурные ловушки рудной минерализации

Типы структурных ловушек рудной минерализации, их морфология и закономерности пространственного размещения, связь с материнскими структурами рассмотрены ниже на тектонофизических моделях и примерах гидротермальных месторождений различного типа.

Структурные ловушки, связанные со сбросами и раздвигами

При аналоговом тектонофизическом моделировании штамповых складок поперечного изгиба и сбросов (рис. 3) были выявлены системы слепых разломов, растущих снизу вверх на затухании сбросов, ограничивающих блоки фундамента, являвшихся механическим штампами [1, 2]. В природных складках такие разрывы могут вмещать слепые рудные жилы, не выходящие на дневную поверхность и не проявленные во вторичных геохимических ореолах. Слепые жилы могут быть выявлены методами электроразведки. На модели по восстанию сброса формируются пологие лестничные разрывы скалывания (рис. 3 б), при этом пологие разрывы могут иметь надвиговую (!) кинематику. Поэтому важно правильно их проинтерпретировать и понять, что они



2

Рисунок 2. Строение зоны разлома в средах с разной реологией. Тектонофизическая модель, по [6] с дополнениями: (а-б) – зоны разрывов, образовавшиеся в чехле над активным разломом фундамента в моделях из глины (а) и влажного песка (б), (в-г) – схемы разрывов в моделях из глины (в) и влажного песка (г), (д) – принципиальная схема внутреннего строения разлома в реологически неоднородном платформенном разрезе. 1 – штампы экспериментальной установки (стрелка – направление движения активного штампа); 2–3 – модели из глины (2) и песка (3); 4 – маркеры; 5 – разрывы; 6 – область разрыхления модельного материала; 7 – крупные (а) и мелкие (б) разрывы; 8 – границы разломной зоны

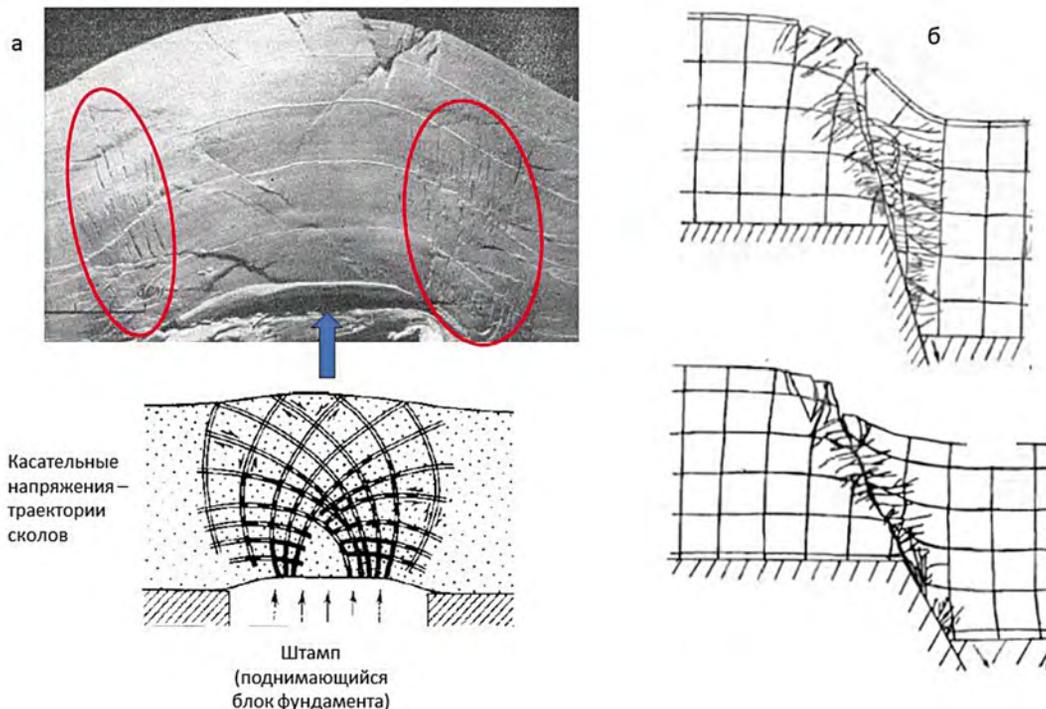


Рисунок 3. Строение зон сбросов в тектонофизических моделях: а – модель штамповой складки поперечного изгиба [2], б – модель опускающегося блока фундамента [1]. Пояснения в тексте

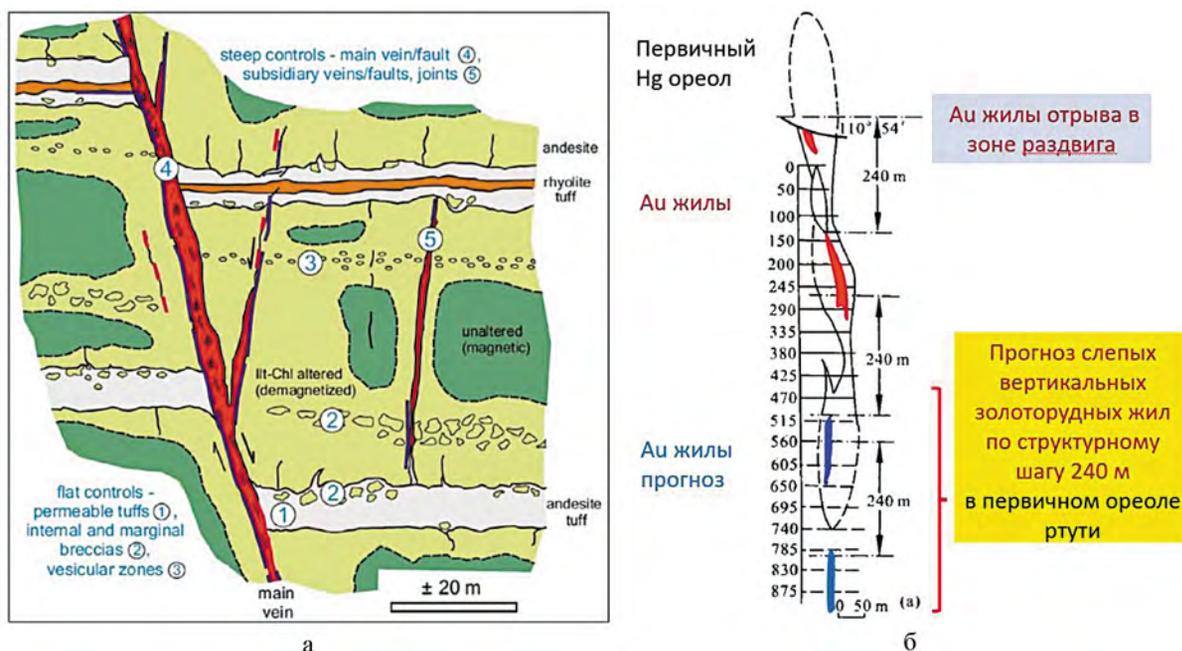


Рисунок 4. Рудные жилы в структурах горизонтального растяжения:

а – крутопадающие слепые золотосеребряные жилы, сопряженные с главной жилой в сместителе сброса в разрезе месторождения Купол на Чукотке [20]; б – золотоносные жилы по трещинам отрыва и прогноз слепых рудных тел на золоторудном месторождении в Китае [22]

связаны именно со сбросом, а не с надвиговой структурой. Для этого необходимо в поле изучать кинематику разрывов, выделять сопряженные системы сколов и восстанавливать тип поля напряжений, в котором формировались разрывы.

На крупном Au-Ag месторождения Купол на Чукотке главная жила выполняет сместитель сброса. Ее оперяют крутопадающие слепые жилы, выполняющие трещины скалывания и отрыва (рис. 4 а). Жилы залегают в метасоматически измененных андезитах [20]. На золоторудном месторождении в Китае в зоне горизонтального растяжения образовались вертикальные трещины отрыва, вмещающие богатые рудные жилы (рис. 4 б). Здесь на верхних горизонтах разведаны и эксплуатируются две разобщенные крутопадающие золотоносные жилы, а две жилы спрогнозированы на глубине с учетом рудного шага 240 м [22].

Структурные ловушки в надвиговых зонах

На месторождении Stawell Gold в Австралии в зоне надвига развиты пологие лестничные жилы вертикального растяжения, оперяющие надвиг, а также жилы, выполняющие шов разлома (рис. 5) [21].

На золото-медном месторождении Маднеули в Грузии мощная зона надвига

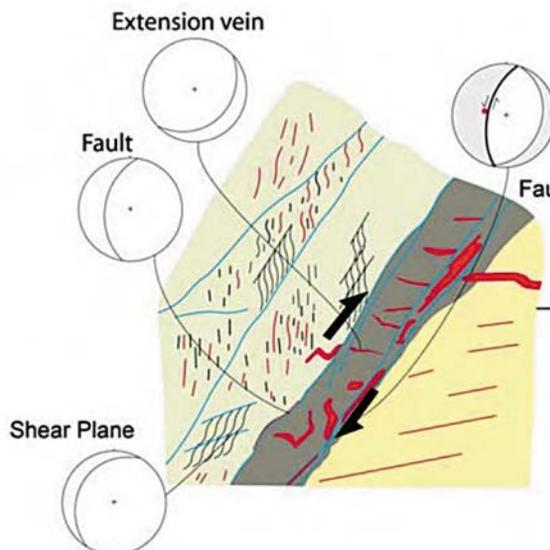


Рисунок 5. Золотоносные кварцевые жилы в шовной зоне надвига: пологие жилы растяжения по трещинам отрыва, оперяющие магистральный разлом (сместитель) надвига, и жилы, залечивающие сместитель [21]

контролирует пологие кулисные золоторудные штокверки вертикального растяжения (рис. 6). С учетом рудного шага слепые штокверки были спрогнозированы на глубину по падению надвига [3].

Седловидные жилы отслоения в замках антиклиналей

Классическим примером золотоносных седловидных кварцевых жил отслоения в замках антиклинальных складок продольного изгиба является австралийское месторождение Бендиго. Подобные жилы здесь известны до глубины 1 км, возможно, будут выявлены и на большей глубине (рис. 7). Месторождение Бендиго устроено не так

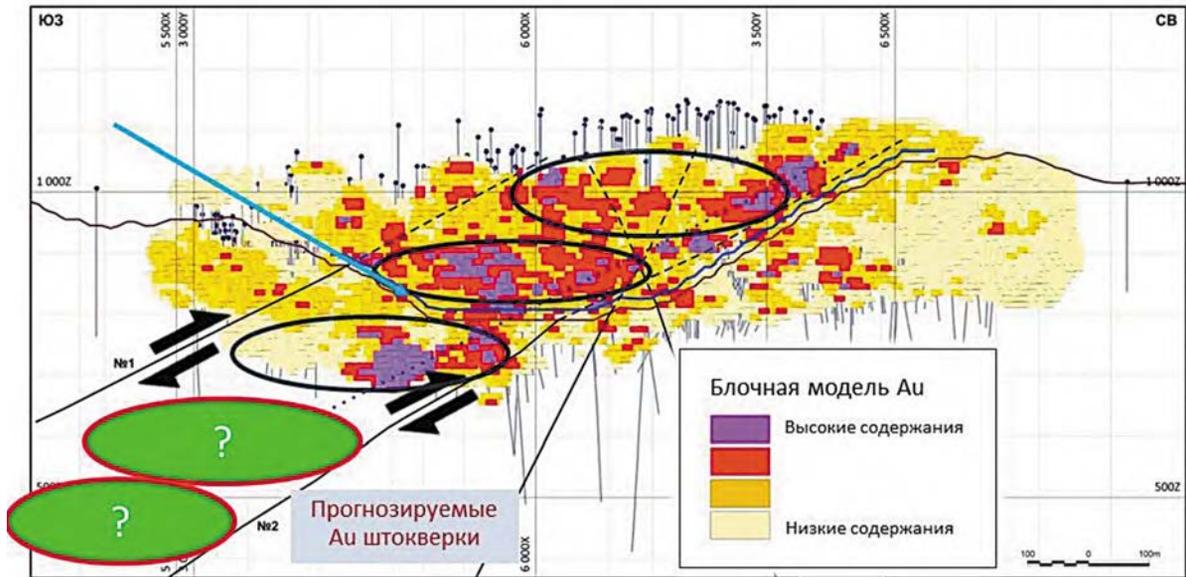
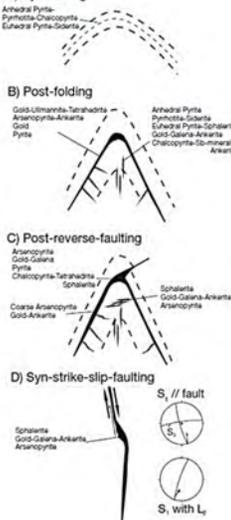
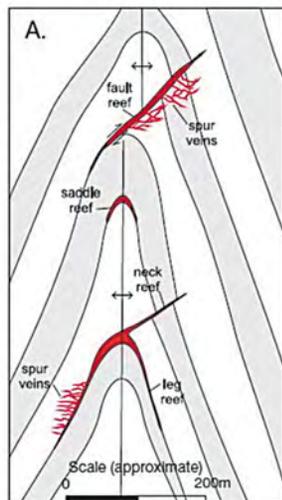


Рисунок 6. Золотоносные кварц-сульфидные пологие штокверки и прогнозируемые штокверки в зоне Главного надвига месторождения Маднеули, Грузия [3]

Модель образования разновозрастных Au жил месторождения Бендиго



Разнотипные секущие жилы образовались при реактивации послонных жил и продольных разломов



Схематический разрез Au месторождения Бендиго, Австралия (ниже границы исторических выработок)

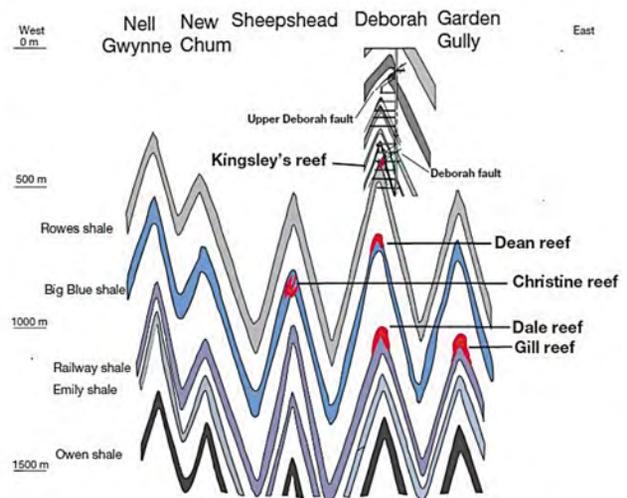


Рисунок 7. Седловидные послонные золотоносные кварцевые жилы и более поздние жилы и штокверки месторождения Бендиго, Австралия [17]

просто, как рисуют в учебниках! Сложные жильные структуры месторождения развивались в процессе прогрессивной деформации в несколько этапов и стадий [17].

Кулисные жилы и минерализованные зоны дробления в дайках и штоках

Кулисные жилы (как рудные, так и безрудные) могут образоваться при хрупкой деформации интрузивных даек и штоков: это крутопадающие и пологие (лестничные в разрезе) структуры растяжения по отрывам и сколам (например, на Колыме это золотосодержащие дайки с пологими и крутыми лестничными жилами; в гранитоидном штоке месторождения Школьное – крутопадающие минерализованные зоны дробления и жилы).

На золоторудном месторождении Sigma-Lamaque в Канаде лестничные минерализованные зоны выполняют сместители надвигов, пересекающие дорудные дайки диорит-порфиритов [19]. Содержание золота в рудных телах здесь крайне неравномерное (рис. 8). Распределение богатых рудных столбов вдоль дайки позволяет наметить траектории «золотых каналов» растяжения, по которым в структуру поступал золотонасыщенный флюид, из которого золото отлагалось в приоткрывающихся трещинах и разрывах.

Красные кружки – микрограммы золота, желтые контуры – участки концентрации высоких значений микрограмма.

Аркообразные жилы и штокверки

Аркообразная форма золоторудных жил характерна для плутоногенно-гидротермального золоторудного месторождения Бестюбе в Северном Казахстане. На участке Центральный, на горизонте -475 м, нами была откартирована структура и установлена надвиговая кинематика наклонных полосчатых золотосодержащих кварцевых жил, которые выполняют сместители надвигов; с этими жилами сопряжены горизонтальные жилы массивной текстуры, выполняющие трещины отрыва. Разработанная структурная модель объясняет образование жил в обстановке активного горизонтального сжатия в зоне сдвига и пассивного вертикального растяжения при контракционной усадке остывающего штока габбро-норитов (рис. 9 а). Согласно модели, жилы могут встречаться на большой глубине, что подтверждается бурением – золотые жилы были пересечены на глубине 1200 м. Максимальные концентрации золота характерны для горизонтальных жил растяжения (содержания золота от 500 до >1000 г/т). Наклонные жилы в пологих надвигах (15–45°) менее богаты золотом (10–500 г/т), наклонные жилы в крутых надвигах и взбросах бедные (от 10 до <1 г/т). Микроструктурные и петрофизические исследования ориентированных образцов из различных кварцевых жил позволили установить пульсационный характер деформаций полосчатых жил и стадийного отложения в них рудных минералов и золота [9, 10].

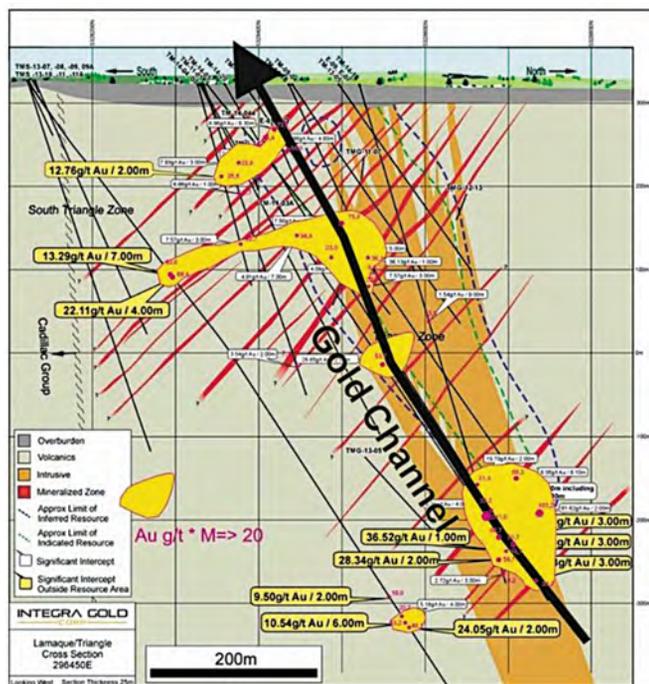


Рисунок 8. Лестничные золотосодержащие жилы в сместителях надвигов, пересекающих дайку диорит-порфиритов. Месторождение Sigma-Lamaque [19], <http://www.integratgold.com>

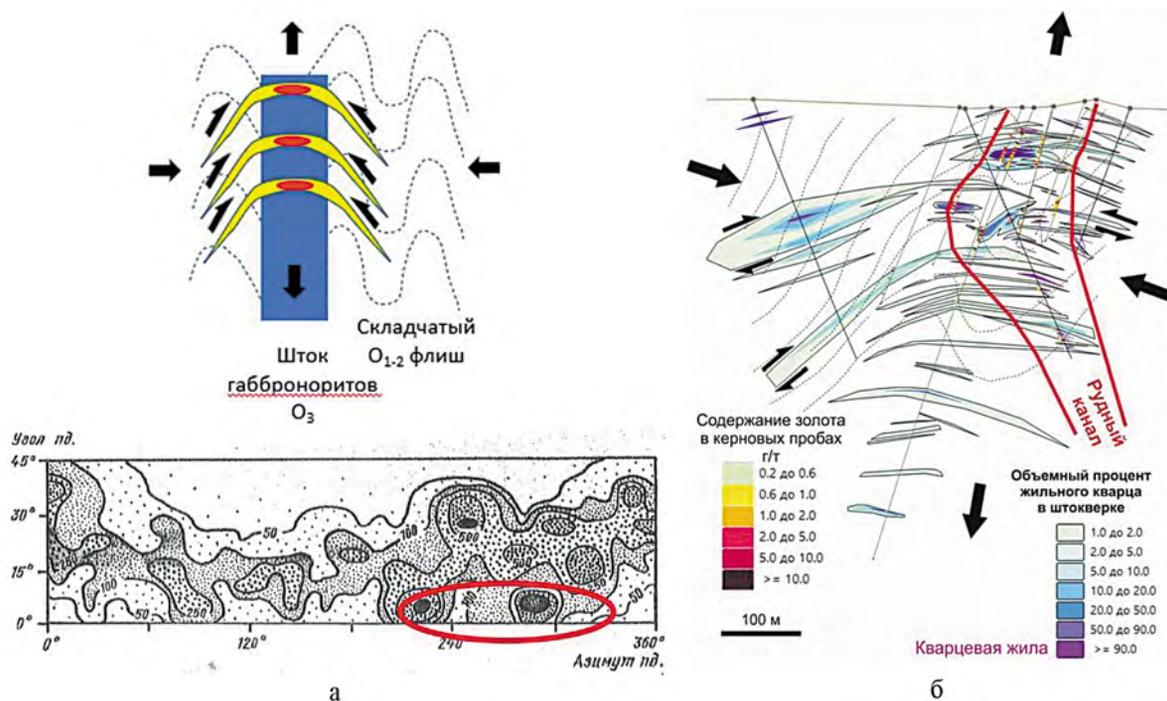


Рисунок 9. Аркообразные золоторудные жилы и штоковки:

а – структурная модель аркообразных жил месторождения Бестюбе на участке Центральный в Северном Казахстане (вверху) и распределение содержания золота в жилах с разными элементами залегания (внизу), по [9]; б – система аркообразных кварцевых штоковок в разрезе на участке Дразный месторождения Дразное [13]. Стрелками показано направление сжатия и растяжения, полустрелками – надвиговая кинематика штоковок

Аркообразная система послескладчатых ленточных штоковок была выделена и изучена нами на золоторудном месторождении Дразное в Якутии [13]. В процессе разведочного бурения были околтурены аркообразные и пологие кварцевые штоковки с надвиговой кинематикой, вмещающие горизонтальные жилы растяжения. Кварцевые штоковки обладают внутренней зональностью по степени насыщенности кварцем (при документации керна оценивался объемный процент кварца).

Содержание в кварце сульфидов очень неравномерное, содержание золота крайне неравномерное. На флангах системы штоковки слабозолотоносные или пустые. Максимальные содержания золота в керновых пробах (от 5 г/т и более) установлены в замке аркообразной штоковковой системы – в горизонтальных кварцевых жилах и прожилках (рис. 9 б). По максимальным концентрациям золота выделяется «рудный (золотой) канал» – параллельный оси растяжения, по которому на поздней стадии развития гидротермальной системы в штоковки и жилы проникали золотонасыщенные растворы, из которых кристаллизовалось золото по трещинам в сульфидах и в кварце. Выявленная рудоносная структура может прослеживаться на большую глубину. Поисковые скважины выявили предсказанные нами золотонасыщенные штоковки на глубине более 500 м.

Аркообразные жилы и штоковки надвигового типа месторождений Бестюбе и Дразное принципиально не отличаются по условиям образования – они сформировались в обстановке горизонтального сжатия и вертикального растяжения. Эти поля напряжений были локальными, связанными с развитием вторичных структур в зоне региональных сдвигов.

Структурные ловушки в сдвиговых зонах

Морфология и локализация структурных ловушек в сдвиговых зонах определяется ориентировкой опережающих и оперяющих разрывов скалывания и отрывов, их густотой и структурным шагом вдоль зоны сдвига. Между окончаниями кулисных сдвигов второго порядка образуются дуплексы сжатия или растяжения. Примером является **сдвиговый дуплекс растяжения** в Среднегорье в Болгарии [19]. В правосдвиговой зоне на сопряжении кулисных сдвигов второго порядка выделяются кулисные зоны растяжения, включающие медно-порфировые и полиметаллические месторождения и проявления, которые сконцентрированы в зонах (структурных трендах) минерализации. Скрытое оруденение в домеловых и меловых породах прогнозируется под чехлом третичных отложений на перекрытых флангах структурных трендов минерализации (рис. 10).

На золоторудном месторождении Сакдриси в Грузии при картировании в карьерах золотоносных кварц-сульфидных штокверков специалистами ИГТ было установлено, что штокверки сформировались как **кулисные структуры горизонтального растяжения** в зоне левого сдвига и располагаются в ней с шагом 500–1000 м (рис. 11). С учетом направления склонения оруденения по простиранию зоны и размера рудного шага были спрогнозированы слепые штокверки на флангах сдвиговой зоны и по ее падению [3]. На некоторых прогнозируемых нами участках поисковые скважины пересекли богатую золотую минерализацию.

На Чукотке в Баимской рудной зоне правого сдвига линейные медно-порфировые и эпитермальные золотосеребряные кварц-сульфидные штокверки располагаются кулисно с определенным шагом (рис. 12 а), что позволяет прогнозировать слепые и перекрытые штокверки [12]. Для крупного медно-порфирового месторождения Песчанка нами разработана структурная модель полихронного линейного кварц-сульфидного штокверка, образовавшегося в зоне регионального правого сдвига [16].



Рисунок 10. Структурные тренды минерализации в сдвиговом дуплексе растяжения в Среднегорье, Болгария (по [18] с дополнениями)

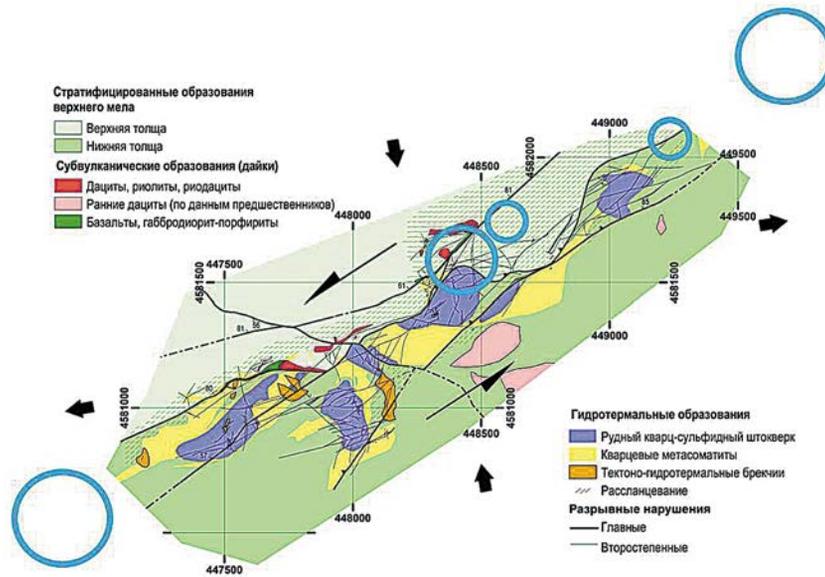


Рисунок 11. Золотоносные структуры Сакдрисской сдвиговой зоны, Грузия. Синие кружки – прогнозируемые рудные штокверки [3]

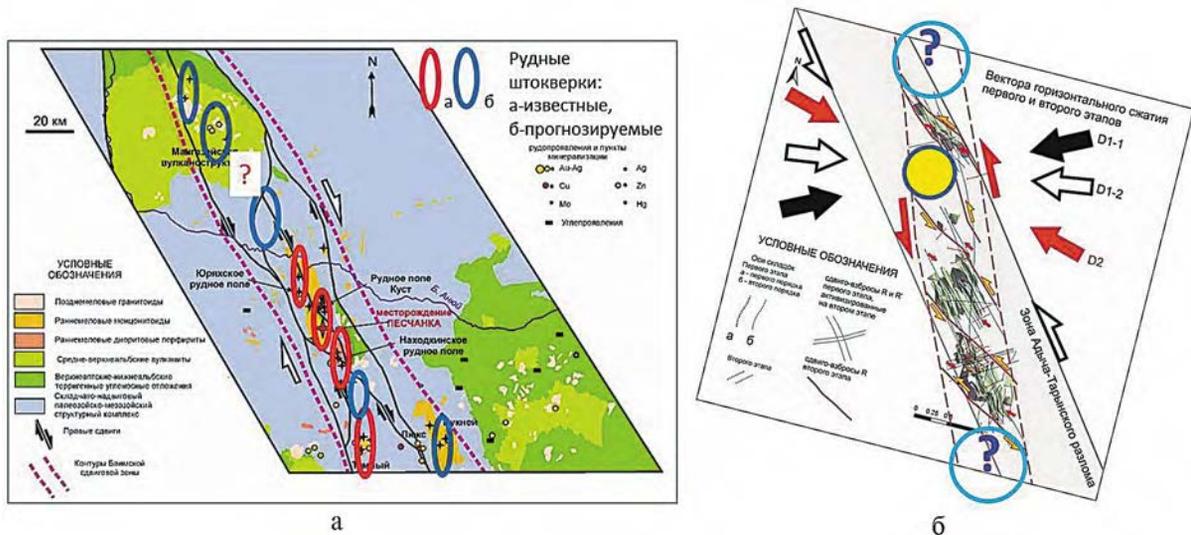


Рисунок 12. Кулисные рудные штокверки в сдвиговых зонах:
а – медно-порфировые месторождения, проявления и прогнозируемые штокверки в Байкальской сдвиговой зоне; б – структурная модель кулисных золоторудных штокверковых систем месторождения Дразное. Синим контуром показаны прогнозируемые штокверки. Желтый кружок – предсказанный и затем обнаруженный слепой штокверк

Прожилково-вкрапленная минерализация в такой структуре прогнозируется на большую глубину, что подтверждено бурением (скважины пересекли руду на глубине около 700 м) и геофизикой (аномалия проводимости прослеживается на глубину более 1 км). На участке Весенний Находкинского рудного поля слепые золоторудные линейные штокверки и жилы, интерпретируемые как структуры растяжения в сдвиговых зонах второго порядка, также были спрогнозированы, а затем обнаружены поисковыми скважинами. Аналоговое тектонофизическое моделирование Байкальской сдвиговой зоны

позволило выявить участки растяжения, которые соответствуют крупным долинам, где по комплексу геологических и геохимических поисковых признаков возможно обнаружение перекрытых и слепых рудных штокверков [8].

На золоторудном месторождении Дразное в Якутии рассмотренные выше ленточные штокверки надвигового типа образуют системы, располагающиеся кулисно в зоне рудоконтролирующего левого сдвига ССЗ простираения, пересекающего под острым углом региональный Адыча-Тарынский разлом СЗ простираения (рис. 12 б).

Сдвиговая модель штокверков сопоставляется с **тектонофизической сдвиговой моделью структур бокового выдавливания Push-Up или с дуплексом сжатия на сочленении кулисных сдвигов Риделя второго порядка** [13]. Штокверки располагаются вдоль сдвиговой зоны с шагом 0,8–1,0 км. На участке Промежуточный штокверк отсутствовал на поверхности и был спрогнозирован на глубине. Наш прогноз позже подтвердился – скважины пересекли слепой кварцевый штокверк и в нем были выделены пологие золоторудные тела.

На рудном поле крупного меднопорфирового месторождения Малмыж в Хабаровском крае были выявлены сульфидно-кварцевые штокверки и откартирована их зональность по интенсивности метасоматических изменений и рудной минерализации [11]. Штокверки имеют удлиненные очертания и маркируют структуры ВСВ, ССВ и СЗ простираения, которые интерпретируются как сопряженные зоны сдвига и растяжения. Автором предложена модель рудоконтролирующего транспрессивного правого сдвига, сопряженного с региональным Сихоте-Алинским левым сдвигом. В пределах Малмыжского рудного поля в узлах пересечения зон сдвига и растяжения прогнозируются рудные штокверки, перекрытые чехлом кайнозойских отложений (рис. 13).

Заключение

Основа структурного прогноза рудной минерализации – достоверная геолого-структурная модель. Для прогноза оруденения важно определить тип структуры, кинематику рудоконтролирующих разломов, типы возможных структурных ловушек, размер и

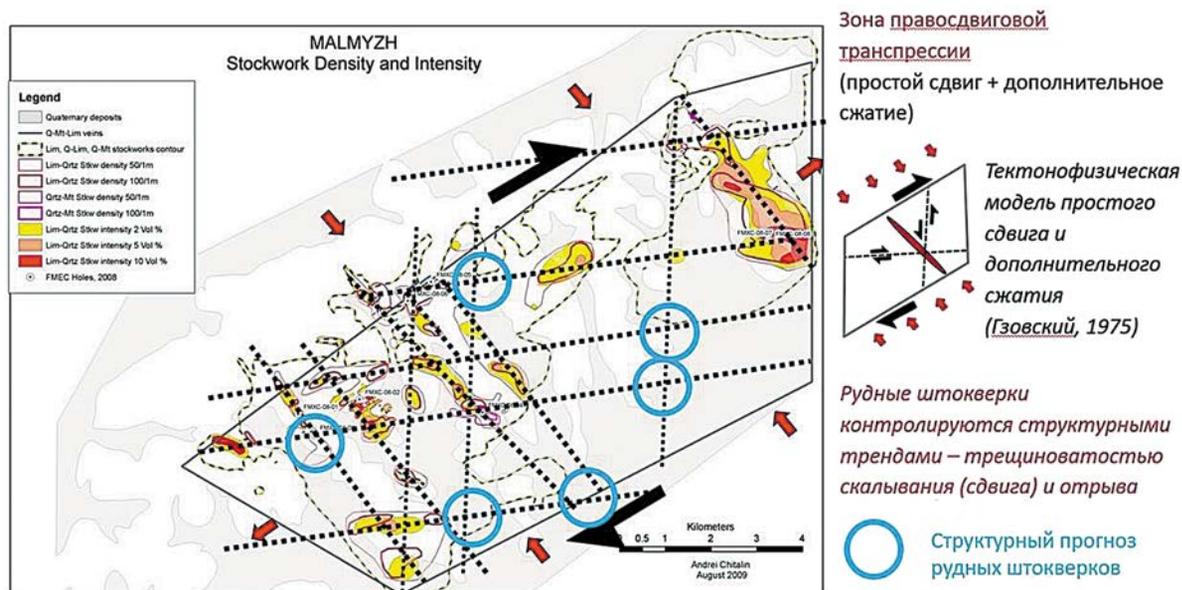


Рисунок 13. Рудные штокверки Малмыжского рудного поля в модели транспрессионного правого сдвига. Голубые кружки – прогнозируемые штокверки

направление структурного шага рудных залежей. Тектонофизическое моделирование важно для понимания структуры и более достоверного прогноза. Геолого-структурный анализ наиболее эффективен в комплексе с данными геохимии и геофизики.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Бокун А.Н. Некоторые закономерности образования разрывных зон в осадочном чехле при погружении блоков фундамента (по результатам физического моделирования). В сб. науч. тр. Эксперимент. тектоника и полевая тектонофизика. Киев: Наук. думка, 1991. С. 112–120.
- 2) Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М., «Наука», 1975, 536 с.
- 3) Попов С.С., Читалин А.Ф., Сивков Д.В., Гришин Е.М. Геолого-структурные исследования и прогноз медно-золоторудной минерализации на месторождениях Сакдриси и Маднеули в Грузии // Труды VI Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2023. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес». Том I (III) [сборник]. Тверь: ООО «Поли-ПРЕСС», 2023. 165 с.: ISBN 978–5–6048839–7–6. С. 69–73.
- 4) Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Гео, 2003. 244 с.
- 5) Семинский К.Ж. Общие закономерности динамики структурообразования в крупных сдвиговых зонах // Геология и геофизика. 1990. № 4. С. 14–23.
- 6) Семинский К.Ж., Бурзунова Ю.П., Борняков С.А. и др. Анализ разломно-блоковой структуры и напряженного состояния осадочного чехла на газоконденсатных месторождениях: основы тектонофизического подхода // Геодинамика и тектонофизика. 2023; 14(2): 0689. Т-2023-14-2-0689.
- 7) Семинский Ж.В., Семинский К.Ж. Тектонофизический анализ обстановок локализации рудных полей и месторождений в разломных зонах земной коры // Геология рудных месторождений, 2004, т 46, № 4. С. 292–304.
- 8) Фролова Н.С., Кара Т.В., Читалин А.Ф. Физическое аналоговое моделирование рудоносной Баимской сдвиговой зоны Западной Чукотки // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. Мат-лы IV Всерос. Конф. с междунар. участием. 17–23 сентября 2018 г. – Дальнаука, Владивосток, 2018. – С. 299–302.
- 9) Читалин А.Ф. Микроструктура кварцевых жил золоторудного месторождения // Научно-техн. достижен. и передовой опыт в области геоэкологии и разведки недр: Инф. сб. М., 1992. Вып.6. С. 12–22.
- 10) Читалин А.Ф., Бакшеев И.А. Разномасштабные структурные парагенезисы золоторудного месторождения Бестюбе (Северный Казахстан) // Структурные парагенезисы и их ансамбли. –М.: ГЕОС, 1997. С. 195–197.
- 11) Читалин А.Ф., Воскресенский К.И., Игнатъев Е.К. и др. Малмыж – новая крупная золото-медно-порфировая система мирового класса на Сихотэ-Алине // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. № 3. С. 68–73.
- 12) Читалин А.Ф. Структурные парагенезисы и рудная минерализация Баимской сдвиговой зоны, Западная Чукотка // Российская тектонофизика. К 100-летию юбилею М.В. Гзовского. – Апатиты: РИО КНЦ РАН, 2019. С. 333–349.
- 13) Читалин А.Ф., Воскресенский К.И., Гришин Е.М. и др. Структурно-кинематическая модель золоторудного месторождения Дразное // Геофизика, № 3, 2018. С. 106–114.
- 14) Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
- 15) Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.

- 16) Chitalin A., Fomichev E., Usenko V., Agapitov D., Shtengelov A., Structural model of Peschanka porphyry Cu-Au-Mo deposit, Western Chukotka, Russia, 2012, Structural Geology and Resources-2012. Bulletin № 56–2012. Symposia 26–28 September 2012, KALGOORLIE WA.
- 17) Christopher J.L. Wilson, Peter M Schaub, and Lawrence D. Leader, 2013. Mineral Precipitation in the Quartz Reefs of the Bendigo Gold Deposit, Victoria, Australia, Economic Geology, v. 108, pp. 259–278.
- 18) Drew, L.J., 2005. A tectonic model for the spatial occurrence of porphyry copper and polymetallic vein deposits—Applications to central Europe: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005–5272, 36 p.
- 19) Francois R., and K. Howard Poulsen, 2001. Vein Formation and Deformation in Greenstone Gold Deposits, Economic Geology, v.14, p.111–155.
- 20) Thomson, B., Pratt, W.T., Rhys, D.A., Oliver, N., Scott W. H., Fischl, P., Akinin, V.V. and Dotzov, D., 2023. The Kupol Epithermal Au-Ag Vein District, Chukotka, Far Eastern Russia, Economic Geology, v. 118, no. 1, pp. 93–122. (20).
- 21) Wilson, C.J.L., Robinson, J.A., Dugdale A.L., 2009. Quartz vein fabrics coupled to elevated fluid pressures in the Stawell gold deposit, south-eastern Australia. Article in Mineralium Deposita, DOI: 10.1007/s00126–008–0215–1. (21).
- 22) Zhang, Jun., 2001. A High-Precision Forecasting Model and Its Constructing Method for Vein-Type Gold Deposit, Journal of China University of Geosciences, Vol 12, No 2, p. 100–107. (22).

ЭКСТРАКЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ ИЗ РАСТВОРОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

*Юрасова О.В., Скуратова Е.А., Королева Е.О.
АО «Гиредмет», Москва*

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) – химический источник тока, который получил широкое распространение в современной мобильной технике. В настоящее время не существует универсального и экономически целесообразного метода переработки отработанных ЛИА, содержащих, помимо лития, такие ценные компоненты, как кобальт, никель, марганец и др. [1, 2]. Однако исследования на данную тему ведутся по всему миру. С учетом возрастающих объемов отработанных аккумуляторов в мире уже созданы производственные линии комплексной переработки ЛИА на таких промышленных гигантах, как Umicore (Бельгия), BASF, Volkswagen (Германия). На предприятиях преимущественно используют гидрометаллургические методы извлечения и очистки ценных компонентов – лития и цветных металлов. Для этого так называемую «черную массу», выделенную из отработанных ЛИА, обрабатывают раствором серной кислоты. В результате литий, цветные и примесные металлы переходят в раствор, из которого их последовательно извлекают. Для разделения кобальта и никеля в сульфатных средах широкое распространение получили методы жидкостной экстракции. Они обладают такими преимуществами, как непрерывность процесса, высокая селективность, высокая степень извлечения и разделения полезных компонентов, возможность полной автоматизации процесса [3]. Для разделения кобальта, меди и никеля применяют различные экстрагенты, в том числе катионообменные. На практике часто используют ди-(2,4,4-триметилпентил) фосфиновую кислоту – «Суапех 272». При оптимальных

значениях pH экстрагент позволяет разделить кобальт, никель, медь с высоким коэффициентом разделения [4].

Целью настоящей работы является извлечение кобальта и никеля их растворов переработки отработанных литий-ионных аккумуляторов.

В РФ задача переработки отработанных ЛИА также является актуальной. Решением занимается АО «ВНИИХТ в рамках ЕОТП-МТ-492. В части извлечения и разделения цветных металлов – кобальта и никеля – задача решается в АО «Гиредмет»; в 2023 г. разработана технология экстракционного извлечения и очистки металлов из растворов переработки отработанных ЛИА (рис. 1).

В качестве исходных растворов исследованы сернокислые растворы переработки ЛИА различного состава после очистки «черной массы» в АО «ВНИИХТ» от примесей (табл. 1).

В качестве экстрагента исследованы технические органические растворы Aliquat 336 и Суапех 272: определены коэффициенты распределения (D) металлов, входящих в состав ЛИА (рис. 2, 3).

Таблица 1
Средний состав исходных исследуемых растворов

Растворы	Состав модельного раствора, г/л								
	Li	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Al	Na	Ca
модельный № 1	3,65	3,7	1,6	8,25	7,3	0,01	0,01	–	–
модельный № 2	4,52	6,37	4,07	11,22	7,27	0,0025	5,22	–	–
модельный № 3	1,15	2	0,03	5,85	1,75	0,260	0,18	51,2	–
модельный № 4	3,04	6,30	0,0001	11,62	69,0	0,0025	0,001	0,36	–
модельный № 5	3,06	0,05	0,0001	11,5	23,0	0,109	0,001	0,14	0,53
технологический № 6	1,16	0,01	0,001	6,42	14,0	0,069	0,011	–	–

Таблица 2
Зависимость коэффициентов распределения от времени экстракции 30 % Суапех 272 в керосине

Коэффициенты распределения (D)							
	Li	Mn	Co	Ni	Cu	Al	Na
D5	0,179	819,0	935,0	8,21	103,0	71,0	0,148
D10	0,150	819,0	1299,0	8,09	103,0	71,0	0,131
D15	0,179	819,0	667,5	8,21	103,0	71,0	0,133
D30	0,243	819,0	834,7	8,21	103,0	71,0	0,153
D60	0,179	819,0	1949,0	8,46	103,0	71,0	0,013

Таблица 3
Коэффициенты разделения при экстракции раствора № 3 30 % Суапех 272

В Коэффициенты разделения								
	Li	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Al	Na
Li	–	4563,0	0,0	5209,3	45,7	573,8	395,5	1,212
Mn		–	0,0	1,14	99,7	7,9	11,5	5531,3
Co				–	113,9	9,1	13,2	6314,8
Ni					–	12,5	8,6	55,5
Cu						–	1,4	695,6
Al							–	479,5

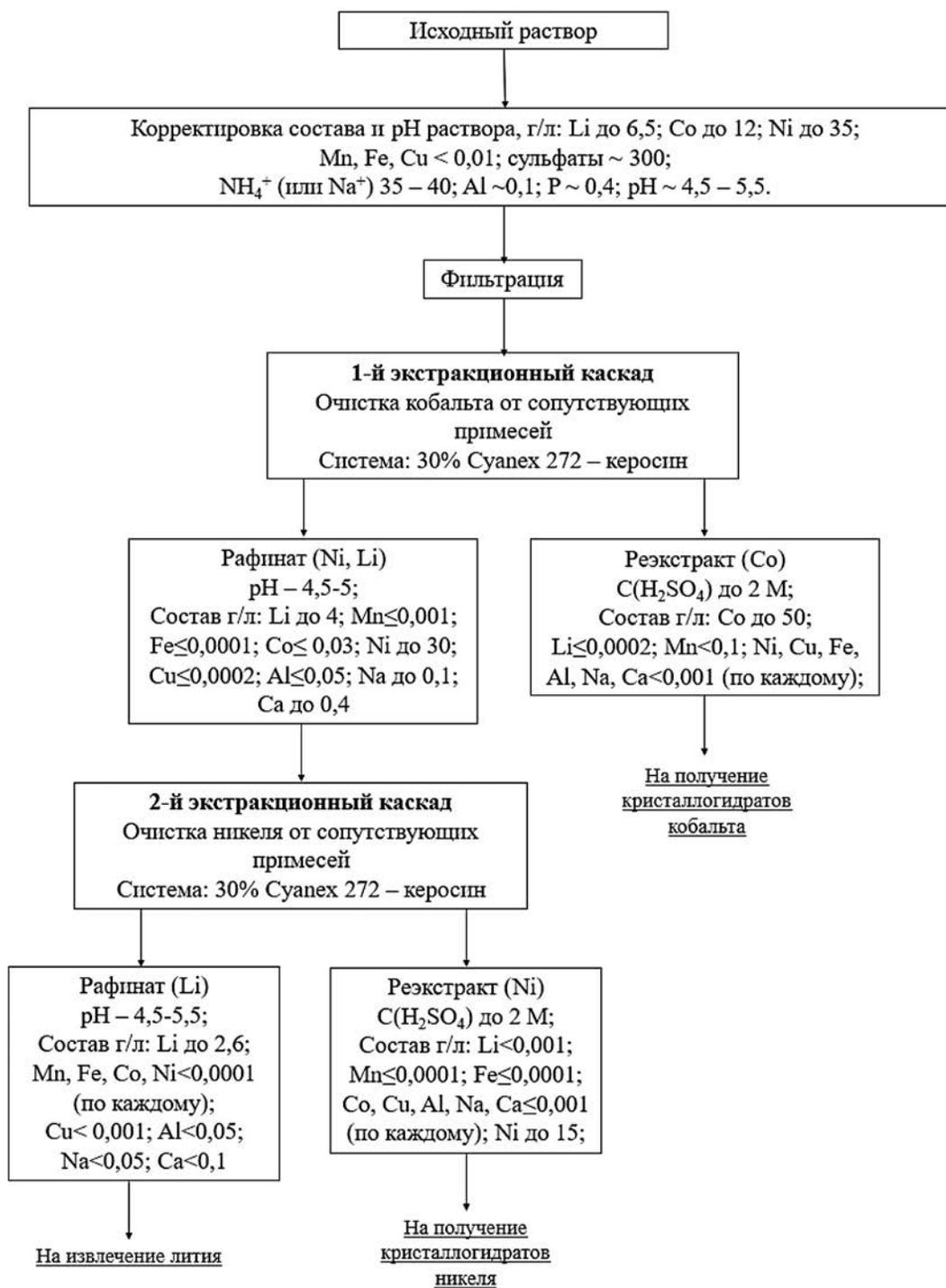


Рисунок 1. Схема извлечения сульфатов кобальта и никеля из сульфатных растворов переработки отработанных литий-ионных аккумуляторов

В качестве экстрагента для извлечения цветных металлов выбран 30 % Суапекс 272 в керосине в аммонийной форме. Установлены оптимальные условия разделения кобальта и никеля и отделения их от лития в зависимости от pH раствора и времени контактирования; определены коэффициенты распределения (D) и разделения (β) (табл. 2, 3).

На основании исследований сделаны выводы:

- достижение равновесия в системе осуществляется за 5 минут;
- расслаивание фаз быстрое, без образования межфазных эмульсий;

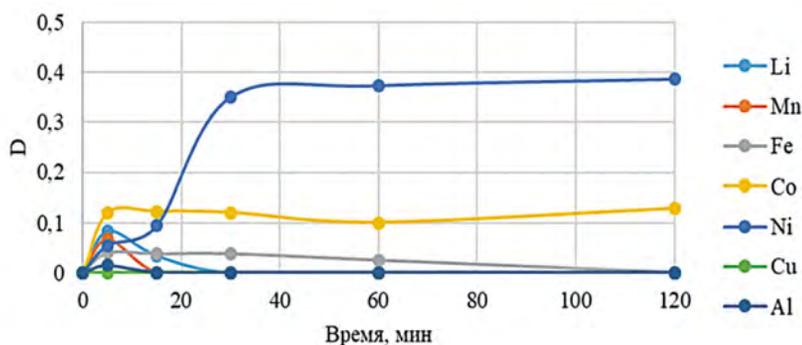


Рисунок 2. Зависимость коэффициентов распределения элементов от времени проведения экстракции Aliquat 336

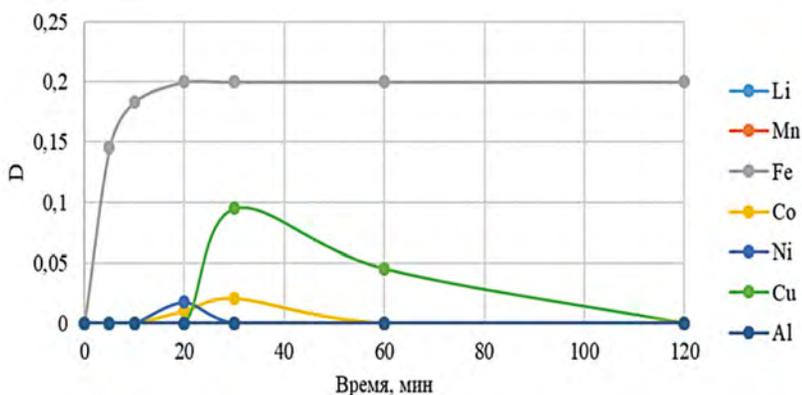


Рисунок 3. Зависимость коэффициентов распределения элементов от времени проведения экстракции Cyanex 272

- литий и натрий не экстрагируются Cyanex 272 (см. табл. 2);
- резкое увеличение коэффициентов распределения экстрагируемых металлов (Mn, Co, Ni, Cu, Al) объясняется концентрацией натрия в растворе № 3, сыгравшего роль высаливателя (см. табл. 2);
- коэффициенты распределения (D) большинства металлов, кроме кобальта, не зависят от времени их экстракции;
- для кобальта D изменяются в пределах от 667 до 1949, трудно отделимой примесью является марганец $\beta_{Co/Mn} \leq 2,4$ (см. табл. 3).

Разработаны условия извлечения марганца из исходного раствора (см. табл. 1, растворы № 5, № 6).

Расчитан экстракционный каскад по извлечению кобальта и отчистки его от никеля [5]. Расчеты проверены экспериментально на экстракционном каскаде, организованном в делительных воронках, состоящем из экстракционной, промывной и реэкстракционной частей (рис. 4). Моделирование процесса проводили по схеме Альдерса [6].

Составы полученного рафината и реэкстракта кобальта приведены в табл. 4.

Из раствора рафината разработаны условия экстракционного извлечения и отчистки никеля с последующим осаждением его кристаллогидратов. Для реализации технологических решений рассчитан экстракционный каскад выделения никеля и получения раствора лития с содержанием суммы цветных металлов менее 0,01 % [5].

Из реэкстракта каскад кобальта и реэкстракта никеля выделены кристаллогидраты сульфатов кобальта и никеля, получены образцы составов: $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ и $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ (рис. 5).



Рисунок 4. Внешний вид экстракционного каскада делительных воронок



Рисунок 5. – Фото образцов кристаллогидратов сульфата кобальта и сульфата никеля

Таблица 4

Состав рафината и реэкстракта каскада извлечения кобальта, г/л

Состав раствора каскада извлечения кобальта г/л									
	Li	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Al	Na	Ca
Рафината	1,96	0,0012	0,0001	0,23	19,5	0,01	0,1	0,12	0,15
Реэкстракт	< 0,001	–	15,8	28,66	0,004	0,22	–	< 0,001	< 0,001

Выводы

Разработанная и экспериментально проверенная технологическая схема экстракционного извлечения кобальта и никеля из растворов переработки ЛИА (см. рис. 1) позволяет получить индивидуальные соединения цветных металлов – сульфата кобальта (II) и сульфата никеля (II) квалификации согласно ГОСТ 4462–78; при этом потери лития составляют << 1 %.

Работа выполнена в рамках договора № 63/5509-Д от 01.08.2023.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Kim T., Song W., Son D., Ono L. K., Qi Y. Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies / J. Mater. Chem. A, 2019, 7, 2942.
- 2) Трифонова П. Батареи просят никеля. Ведомости. 2019. 19 июля. С. 11.
- 3) Касиков А.Г., Рыбин С.Г., Богрова Е.Г., Шарандо М.А. Экстракционное извлечение меди, кобальта и серной кислоты в технологии переработки сульфидной никель-кобальтовой массы / Новые подходы в химической технологии минерального сырья. Применение экстракции и сорбции. Материалы научной конференции. Часть 2. Апатиты, 2013.
- 4) RU 2617471 C1, 2017.
- 5) Гасанов А.А., Семенов А.А., Апанасенко В.В., Юрасова О.В. Расчет полного противоточного экстракционного каскада с обменной промывкой с использованием Excel // Цветные металлы. 2016. № 5. С. 44–49.
- 6) Альдерс Л. Жидкостная экстракция. М.: Иностран. лит. 1962. 90 с.

УДК 553.04:553.493:622

Т 78

Научное издание
ФГБУ «ВИМС»

Сборник докладов
Третьей научно-практической конференции

«Минерально-сырьевая база металлов высоких
технологий. Освоение, воспроизводство,
использование»

Компьютерная верстка А.А. Полищук
Макет обложки В.А. Лихтнер
Редактор О.А. Арманд

Редакционно-издательский сектор (РИС) ВИМС.
119017, Москва, Старомонетный пер., д. 31.
Тел. 8 (495) 950 35 70

Подписано в печать 27.05.2024 г.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 12,38. Печать цифровая. Тираж 100 экз.
Отпечатано в ООО "Клуб Печати", Заказ № 21812.
127018, г. Москва, Марьиной Рощи 3-й проезд, дом № 40, строение 1

ISBN 978-5-6049827-2-3

© Коллектив авторов
© ФГБУ «ВИМС», 2024 г.



9 785604 198272 3