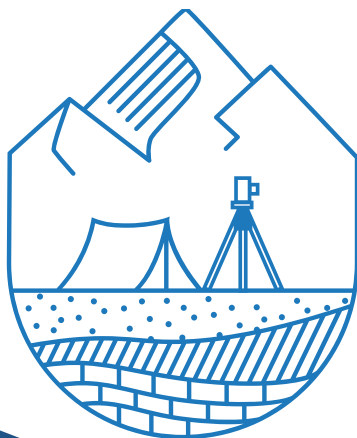




ВТОРАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОИСКОВОЙ ГЕОЛОГИИ



## СБОРНИК ДОКЛАДОВ

МОСКВА, ФГБУ «ВИМС»

19–21 НОЯБРЯ 2024

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

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

**Вторая научно-практическая конференция**

# **«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОИСКОВОЙ ГЕОЛОГИИ»**

**СБОРНИК ДОКЛАДОВ**

19-21 ноября 2024 г.

Москва, 2025 г.

УДК 550.8 (063)  
А 43

**А 43 Сборник докладов второй научно-практической конференции  
«Актуальные проблемы поисковой геологии». М.: ФГБУ «ВИМС», 2025, 242 с.  
ISBN 978-5-6053855-1-6**

В сборнике представлены доклады участников конференции «Актуальные проблемы поисковой геологии», состоявшейся 19-21 ноября 2024 г. в ФГБУ «ВИМС». Темы конференции, по которым опубликованы доклады:

- Стратегические приоритеты в сфере геологического изучения недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых
- Ключевые направления поисков: регионы и виды твердых полезных ископаемых
- Подготовка поисковых площадей: роль крупномасштабных региональных работ и прогнозно-минерагенических работ
- Практика поисков: стратегия и тактика успеха
- Современные методы и технологии поисковых работ
- Лабораторно-аналитическое и технологическое обеспечение геологоразведочных работ

**Организаторы конференции:**

Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации

Федеральное агентство по недропользованию

Российская академия наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского"

**Оргкомитет конференции:**

Председатель: О.В. Казанов

Члены оргкомитета: А.А. Гермаханов, Н.С. Бортников, Г.Л. Вурсий, А.И. Иванов,  
П.А. Игнатов, Р.С. Контарович, А.А. Коровко, С.А. Лысенко,  
Г.А. Машковцев, А.В. Паршин, В.А. Петров, А.А. Рогожин, А.В. Руднев,  
И.Л. Свинтицкий, И.Г. Спиридонов, В.И. Старостин, С.И. Трушин,  
И.Б. Турамурадов, Е.Г. Язиков

**Партнеры:**



ISBN 978-5-6053855-1-6

© Коллектив авторов  
© ФГБУ «ВИМС», 2025 г.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Вторая научно-практическая конференция</b><br><b>«Актуальные проблемы поисковой геологии» в ФГБУ «ВИМС»</b> .....                                                                                                                                                                               | 6  |
| <i>Абакумов И.В., Бушарина С.В.</i><br>ЗНАЧИМОСТЬ ПОИСКОВ КРУПНОТОННАЖНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЯДОВЫХ<br>И БЕДНЫХ РУД НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ПРОМЫШЛЕННОГО РАЗВИТИЯ<br>УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА.....                                                                                                             | 8  |
| <i>Абраменков К.С., Алферова В.А., Бондаренко Н.В., Кудрявцева О.Е.</i><br>НАХОДКА СПЕРРИЛИТА В СУЛЬФИДНЫХ БРЕКЧИЯХ УЧАСТКА ЖЕРЛОВЫЙ,<br>МАЛОМУРУНСКИЙ ЩЕЛОЧНОЙ МАССИВ (Республика Саха (Якутия)).....                                                                                             | 14 |
| <i>Ажгалиев Д.К., Нурсултанова С.Н., Абилова М.К., Жиенгалиев А.С.</i><br>РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ФОРМАТЕ ГИС-АТЛАС И ОЦЕНКА<br>ПОИСКОВЫХ ОРИЕНТИРОВ ПРИ ПРОГНОЗЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ<br>ЦЕННЫХ ВИДОВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ .....                                                                       | 17 |
| <i>Бударина Т.В., Антипова А.П., Миронова Е.В.</i><br>3D-МОДЕЛИ – СОВРЕМЕННОЕ СРЕДСТВО ИЗУЧЕНИЯ УСЛОВИЙ ЗАЛЕГАНИЯ<br>УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА СТАДИИ ПОИСКОВ .....                                                                                                                                      | 25 |
| <i>Воробьев Ю.В., Банадысева М.Д., Мирошниченко Ю.В., Иванов Д.В., Лапковский А.А.</i><br>РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ ПОИСКОВОЙ СТАДИИ ГРП<br>НА МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТАХ НОРИЛЬСКОГО ТИПА<br>НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ 3D-ВП.....                                                     | 31 |
| <i>Глушкова Т.А., Перелыгин Д.В., Мирошниченко И.В., Талалай А.Г., Шинкарьук И.Е.</i><br>РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ<br>В ОБЛАСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ НЕДР .....                                                                                                | 40 |
| <i>Гребенкин Н.А., Карманов Е. Н., Леденева Н. В., Мишин И. А., Полбина К. А.,<br/>Прозоров В. А., Чепчугов А. М., Петрин А.В.</i><br>ОПЫТ КАРТИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ТИПОВ РУД ЗОНЫ ОКИСЛЕНИЯ<br>ЗОЛОТО-УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕВЕРНОЕ (ЭЛЬКОНСКИЙ<br>РУДНЫЙ РАЙОН, РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ)) ..... | 48 |
| <i>Imamverdiyev N.A., Sariyev F.H., Babayeva G.J.</i><br>PETROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE FORMATION OF SUB-ALKALINE<br>PICRITS OF THE KHOJAVEND SUBZONE .....                                                                                                                                   | 55 |
| <i>Лаломов А.В., Григорьева А.В., Иванова Л.А.</i><br>ХРОМИТОЛИТЫ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ВЕП –<br>ГЕНЕЗИС, ИСТОЧНИКИ, СЫРЬЕВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ.....                                                                                                                                          | 57 |



|                                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Лапин С. О., Прохоров Д.А., Сащенко А.В., Масло М.Ю., Ржевская А.К., Гулынин А.В., Овсянникова Т.М., Несмеянова А.И., Ладейщиков А.В.</i>                                                                                                           |     |
| ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ УРАНОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ ПАЛЕОДОЛИННОГО ТИПА НА ФЛАНГАХ ДЕЙСТВУЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА ЗАУРАЛЬЯ.....                                                                                                                                | 65  |
| <i>Мессерман И.З.</i>                                                                                                                                                                                                                                  |     |
| СТРУКТУРНАЯ ГЕОХИМИЯ С ПОЗИЦИЙ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА .....                                                                                                                                                                                                | 73  |
| <i>Михеева Е.Д., Курбанов И.Н., Табаков Н.М.</i>                                                                                                                                                                                                       |     |
| ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ .....                                                                                                                                                               | 84  |
| <i>Молчанов А.В., Белова В.Н., Семенова В.В.</i>                                                                                                                                                                                                       |     |
| ПЕТРОГРАФО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ И КАРТИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ КАК ОСНОВА ВЫДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗОЛОТО-УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЭЛЬКОНСКОГО ЗОЛОТО-УРАНОВОРУДНОГО УЗЛА)..... | 93  |
| <i>Морозова Л.Н.</i>                                                                                                                                                                                                                                   |     |
| ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ, ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПОИСКОВ ЛИТИЕВЫХ ПЕГМАТИТОВ (НА ПРИМЕРЕ КОЛМОЗЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ).....                                                                                                                     | 110 |
| <i>Ножкин А.Д., Лиханов И.И.</i>                                                                                                                                                                                                                       |     |
| ЗОЛОТО В ДОКЕМБРИЙСКИХ ПОРОДАХ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА: ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ .....                                                                                                                     | 116 |
| <i>Нурканов Е.Ю., Петров М.С., Гусев А.О., Кадушников Р.М.</i>                                                                                                                                                                                         |     |
| ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ И ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ.....                                                                                                                   | 128 |
| <i>Петрова Н.С., Денисова Н.Ю., Глаз Н.В.</i>                                                                                                                                                                                                          |     |
| ПРОГНОЗНО-МИНЕРАГЕНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ КАЛИЕНОСНОЙ СУБФОРМАЦИИ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭФФЕКТИВНОГО ОСВОЕНИЯ РЕСУРСОВ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ .....                                                                                             | 131 |
| <i>Печенкин И.Г.</i>                                                                                                                                                                                                                                   |     |
| ОПЫТ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРОГНОЗНЫХ И ПОИСКОВЫХ ПЛОЩАДЕЙ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕСЧАНИКОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА.....                                                                                                              | 141 |
| <i>Поцелуев А.А., Ананьев Ю.С., Житков В.Г.</i>                                                                                                                                                                                                        |     |
| МАТЕРИАЛЫ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ МПИ (U, Au)....                                                                                                                                                                                    | 148 |

|                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Руденко А.А.</i><br>УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПОСОБ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ<br>ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РУД.....                                                                                                   | 162 |
| <i>Русакова М.-А., Машковцев Г.А.</i><br>ПОРТАТИВНЫЙ СПЕКТРОМЕТР LIBS: ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД<br>К ОЦЕНКЕ СОДЕРЖАНИЯ ЛИТИЯ В РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ПЕГМАТИТАХ.....                                                  | 166 |
| <i>Саблуков С.М., Саблукова Л.И.</i><br>К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРАНАТОВ<br>ЭКЛОГИТОВОГО ПАРАГЕНЕЗИСА ПРИ ШЛИХО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ<br>ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ.....                       | 178 |
| <i>Савичев О.Г., Домаренко В.А.</i><br>ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ<br>ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТЛОЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОТОКОВ<br>ГОРНОГО АЛТАЯ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ).....                | 184 |
| <i>Симаков С.К., Стегницкий Ю.Б.</i><br>МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ НАЛИЧИЯ<br>КРУПНЫХ АЛМАЗОВ В КИМБЕРЛИТАХ .....                                                                        | 194 |
| <i>Солодов И.Н., Нестерова М.В.</i><br>КОНЦЕПЦИЯ РУДООБРАЗОВАНИЯ И НОВЫЕ КРИТЕРИИ ВЫЯВЛЕНИЯ<br>УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВИТИМСКОГО ТИПА.....                                                                 | 200 |
| <i>Сычев В.Ю.</i><br>ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ<br>НА КРУТОНАКЛОННОМ И ВЕРТИКАЛЬНОМ РЕЛЬЕФЕ ПРИ ПОМОЩИ<br>МЕТОДА МВР (МЕТОД ВЕРТИКАЛЬНОЙ РАЗВЕДКИ) .....                          | 214 |
| <i>Читалин А.Ф., Агапитов Д.Д.</i><br>ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОЦЕНКИ<br>ПЕРСПЕКТИВ ВЫЯВЛЕНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЮЖНОЙ АВСТРАЛИИ ...                                           | 217 |
| <i>Шац А.Л., Кара Т.В., Янюшин А.М.</i><br>РЕГИОНАЛЬНЫЕ РАБОТЫ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ТАРГЕТИРОВАНИЕ<br>ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВ ОРУДЕНЕНИЯ ВИТВАТЕРСРАНДСКОГО ТИПА<br>НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ..... | 231 |

## **Вторая научно-практическая конференция «Актуальные проблемы поисковой геологии» в ФГБУ «ВИМС»**

19-21 ноября 2024 г. в ФГБУ «ВИМС» состоялась Вторая научно-практическая конференция «Актуальные проблемы поисковой геологии».

В трехдневной работе конференции приняли участие более 450 специалистов геологоразведочной отрасли из Российской Федерации, в том числе подведомственных организаций Роснедр, РАН, Минобрнауки РФ, АО «Росгеология», представителей организаций-недропользователей (АО «Полиметалл УК», ООО «УК Полюс», ООО «Норникель Технические сервисы», АК «Алроса» (ПАО) и др.).

Благодаря участию зарубежных коллег из Республик Беларусь, Казахстан, Азербайджан, Сирийской Арабской Республики конференция приобрела статус международной.

19 ноября в рамках открытия конференции с приветственным словом к участникам обратились руководитель Федерального агентства по недропользованию Олег Владимирович Казанов, академик РАН, секретарь отделения наук о Земле РАН Николай Стефанович Бортников, президент Российского геологического общества Григорий Анатольевич Машковцев.

В ходе пленарной сессии в своем докладе руководитель Роснедр О.В. Казанов отразил проблемы и выделил приоритеты развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации, представил сложившиеся тенденции геологоразведочных работ.

В течение трех дней было заслушано и обсуждено 68 докладов.

Доклады были посвящены: ключевым направлениям поисков твердых полезных ископаемых различных видов; проблемам, возникающим при подготовке поисковых площадей; инновационным технологиям, в том числе цифровым, внедряемым при поисках.

Ведущие специалисты ФГБУ «ВИМС» Фатеева Анна Александровна, Дорожкина Людмила Алексеевна, Чекмарев Кирилл Владимирович, Несмеянова Анна Игоревна, Печенкин Игорь Гертрудович, Гребенкин Николай Анатольевич и другие представили разноплановые доклады, касающиеся важнейших направлений и эффективного методического сопровождения ГРР.

Среди работ молодых специалистов выделялись доклады Лапина Степана Олеговича, Русаковой Марии-Анны, Тубольцева Ивана Сергеевича, Кондря Кристины Олеговны и представителя Сирийской Арабской Республики – аспиранта МГРИ Мазена Алзаммара, представленные во второй и третий день работы конференции.

По итогам работы конференции были вынесены на обсуждение следующие вопросы и предложения:

- при значительном количестве геологоразведочных работ практически отсутствует поисковый задел на многие твердые полезные ископаемые;
- при региональных исследованиях регулярно выполняются работы по выделению перспективных рудных районов и поисковых площадей, но в сообщениях не представлены данные по их вовлечению в поисковые работы;
- по научно-методическому сопровождению геологоразведочных работ надо усилить роль отраслевых институтов, являющихся связующим звеном между академической (фундаментальной) наукой и потребителем (недропользователем).

- уже давно требуется обновить и переиздать справочник «Требования к минеральному сырью», так необходимого недропользователям. За более чем 25 лет, прошедших с года последнего выпуска, произошли изменения в экономике; разработаны и применяются современные приборы и методы, позволяющие наиболее глубоко изучать и перерабатывать минеральное сырье; появилась возможность создавать новые высокотехнологичные материалы, другие продукты передела; стали более жесткими экологические требования. Все эти изменения должны быть отражены в документах и методических рекомендациях.

На конференции было представлено значительное число докладов по опережающим работам с использованием геохимических, геофизических методов при поисках различных видов полезных ископаемых, а также способов геологосъемки. Вместе с тем, из материалов докладов стало ясно, что работы осуществляются на импортном оборудовании, т. е. существенного обновления приборной базы российскими приборами не произошло. Данное положение дел требует отдельного рассмотрения и принятия соответствующих решений. Как показывает исторический опыт, импортозамещение – сложный процесс и требует более длительных сроков реализации и постоянного контроля.

В качестве положительных моментов участники конференции отметили, что в последние годы существенно повысился уровень подготовки молодых специалистов, подготавливаемых высшими и специальными учебными заведениями страны для предприятий геологической отрасли.

По решению оргкомитета представленные на конференции доклады изданы в виде сборника научных трудов в авторском варианте.

## **ЗНАЧИМОСТЬ ПОИСКОВ КРУПНОТОННАЖНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЯДОВЫХ И БЕДНЫХ РУД НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ПРОМЫШЛЕННОГО РАЗВИТИЯ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА**

*Абакумов И.В. – 1,2, Бушарина С.В. – 1*

*1 – ФГКУ «Росгеолэкспертиза», Уральский территориальный отдел, г. Екатеринбург,*

*2 – ФГБОУ ВО «УГГУ», г. Екатеринбург*

Известно, что среди всего многообразия природных типов месторождений далеко не все из них играют значимую роль в текущем балансе запасов и добычи отдельных видов минерального сырья. Природные типы месторождений, в которых сосредоточены основные запасы, и входящие в число основных поставщиков того или иного вида минерального сырья, относятся к промышленным типам [1]. Промышленный тип месторождений полезных ископаемых – это «временная категория», определяемая современным состоянием сырьевой базы и накопленным опытом горного, обогачительного и металлургического производства, достижениями в вопросах совершенствования прогнозно-поисковых комплексов и внедрения их в практику. В последние десятилетия вследствие истощения минерально-сырьевой базы и стабильного роста цен на ряд металлов (медь, золото и др.) в Мировом чётко обозначилась тенденция перехода на массовую отработку быстро подготавливаемых крупнотоннажных месторождений с рядовыми и бедными легкообогатимыми рудами.

Урал является старейшим горнорудным регионом страны, где уже почти 400 лет осуществляется промышленная добыча и переработка руд. По мере истощения разведанных неглубоко залегающих запасов богатых и рядовых руд в промышленное освоение вовлекаются всё более бедные руды. Подобная тенденция прослеживается даже на коротких временных интервалах; так, среднее содержание меди в погашаемых запасах уральских месторождений с 2016 по 2023 гг. снизилось в 2 раза – с 1,10 % до 0,53 %, при этом суммарные объёмы добычи и переработки руд увеличились почти в три раза (рис. 1).

Главные промышленные типы месторождений меди на современном этапе освоения Урала – объекты медноколчеданного и медно-порфирового типов. На их долю приходится более 80 % всех разведанных и оцененных балансовых запасов медных руд в регионе (рис. 2). Оставшаяся часть запасов перераспределяется преимущественно между полигенными ванадиево-железо-медными месторождениями «волковского» типа, связанными с габброидами концентрически-зональных массивов Платиноносного пояса Урала, и комплексными медьсодержащими месторождениями (скарновыми медно-магнетитовыми, колчеданными медно-золоторудными и др.). Малая доля (0,3-0,4 %) приходится на техногенные образования (пиритные огарки, «хвосты» обогащения, металлургические шлаки).

В структуре региональной минерально-сырьевой базы меди отмечается стабильное увеличение доли балансовых запасов крупнотоннажных медно-порфировых месторождений. И, если ещё четверть века назад отмечалось, что «эти объекты по ряду геолого-экономических причин промышленного значения не имеют, но на них отмечаются достаточно значительные прогнозные ресурсы медных руд, что позволяет рассматривать их в качестве резервной сырьевой базы медной промышленности Урала уже



Рис. 1. Графики изменения объемов добычи медных руд и содержаний меди в погашаемых запасах месторождений Уральского региона в 2016-2023 гг.

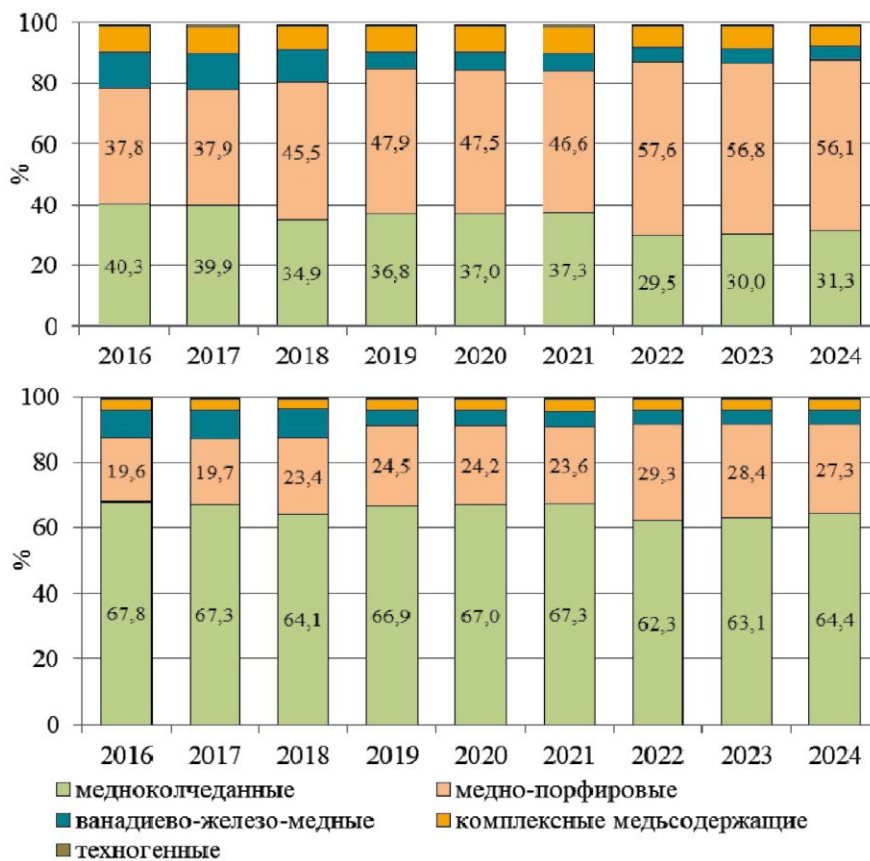


Рис. 2. Распределение балансовых запасов медных руд (верхний график) и меди (нижний график) уральских месторождений по промышленным типам (в процентах, на начало года)

после 2000 года (особенно в связи с развитием геотехнологических методов добычи)» [2], то уже в 2017 году в регионе был достигнут паритет в балансовых запасах медно-порфировых и медно-колчеданных руд, а в 2022-2024 гг. доля медно-порфировых руд

почти в 2 раза превышала долю медных колчеданов, традиционного для Урала промышленного типа руд. Между тем основные запасы меди на Урале (~ 60 %) по-прежнему сконцентрированы в рудах колчеданного типа.

Медь относится к востребованным высоколиквидным металлам современной экономики, что отражается в росте объемов добычи руд и производства этого металла как в мировом, так и в региональном масштабах. По отношению к принятому «базису» – 2015 году – объемы добычи медных руд в Уральском регионе в 2021-2023 гг. увеличились в 2,8-2,9 раза, меди – в 1,3-1,6 раза (см. рис. 1). В 2018 году объемы добычи медно-порфировых руд, а в 2021 году и объемы добычи меди, связанные с этим протипом руд, превысили аналогичные показатели медно-колчеданных месторождений (рис. 3).

Относительно низкие эксплуатационные расходы на добычу и переработку руд позволили определить рентабельные варианты освоения уральских медно-порфировых месторождений. Установлено, что минимальная годовая производственная мощность горно-обогатительного комплекса, базирующегося на рудах медно-порфирового типа, должна составлять не менее 10 млн т руды [3].

Современные объемы добычи на месторождениях медно-порфирового типа составляют порядка 80 % всей текущей добычи медных руд региона, обеспечивая при этом более 50 % добычи меди (рис. 3). Важно отметить, что в регионе разрабатывается около 30 медных и медьсодержащих месторождений, из них медно-порфировых только два – Михеевское и Томинское. По суммарным запасам меди упомянутые месторождения относятся к участкам недр федерального значения.



Рис. 3. Распределение объемов добычи медных руд (верхний график) и меди (нижний график) уральских месторождений по протипам (в процентах)

Медно-порфировые руды относятся к комплексному минеральному сырью; помимо меди, они содержат незначительное количество попутных компонентов — золота, серебра, молибдена, рения, платины и палладия [4], также относящихся к разряду стратегически важных полезных ископаемых [5]. Достигнутые технологические показатели переработки медно-порфировых руд уральских месторождений, в частности, степень концентрирования (обогащения) рудной массы, когда содержание меди в товарных концентратах почти на два порядка превышает её содержание в перерабатываемой руде, создают благоприятные предпосылки для извлечения попутных компонентов (в первую очередь связанных с основным компонентом — медью). На долю Михеевского и Томинского месторождений приходится порядка 15 % всей текущей добычи золота на Урале.

В результате проведенных в регионе в 2016-2023 гг. геологоразведочных работ, включая камеральную переоценку запасов, получен прирост балансовых запасов медных руд, превышающий их фактическое погашение в 1,4 раза. Однако приведенная величина прироста запасов руд не обеспечивает компенсацию погашенных запасов металла за этот период (компенсируется лишь половина добытого металла). Прирост запасов меди, способный компенсировать её добычу, обеспечивают лишь медно-порфировые и комплексные медно-золоторудные месторождения.

Тенденции интенсивного вовлечения в промышленное освоение крупнотоннажных месторождений с бедными рудами на Урале присущи не только медным рудам. Около 90 % объемов текущей добычи железных руд в регионе обеспечивается за счет титаномагнетитовых месторождений (Гусевогорского и Собственно-Качканарского), представляющих собой зоны концентрированной вкрапленности (с шлировыми и жило-линзообразными обособлениями) ванадий- и титансодержащих магнетитов в интрузивах габбро-пироксенит-дунитовой формации. Отличительной чертой качканарских руд является низкое содержание железа общего — 16-17 %, а содержание «рудного» железа составляет всего 11-13 %. Руды комплексные; помимо железа промышленный интерес в них представляет ванадий (среднее содержание в качканарских рудах  $V_2O_5$  — 0,12-0,14 %). Разработка качканарских месторождений не компенсирует полностью потребности уральских металлургических заводов в железорудном сырье, однако она обеспечивает более 90 % объемов российской добычи стратегически важного металла — ванадия, используемого как в традиционной области его промышленного применения — металлургии, так и в новых современных перспективных направлениях, связанных с «зеленой» энергетикой, при производстве мощных литиевых батарей и аккумуляторов.

Интерес к геологическому изучению недр с целью выявления новых крупнотоннажных месторождений в Уральском регионе растет, что подтверждается статистикой проектов, представляемых на государственную экспертизу в Уральский территориальный отдел ФГКУ «Росгеолэкспертиза» (рис. 4).

Если в 2019-2021 гг. ежегодно на экспертизу представлялись один-два проекта, ориентированные на поиски крупнотоннажных объектов медно-порфирового типа, то в 2023-2024 гг. количество подобных проектов увеличилось до восьми, и касались они не только медно-порфирового оруденения, но и комплексных ванадиево-железных, ванадиево-железо-медных с благороднометалльной специализацией объектов, связанных с концентрически-зональными базит-гипербазитовыми массивами платиноносного пояса Урала (оруденение «качканарского», «волковского» типов). На самом Волковском месторождении, где среднее содержание меди составляет ~ 0,6 %, планируется нарастить мощности по добыче и переработке руд на 4,9 млн т к 2025 г. и на 9,8 млн т — к 2027 г. [6]. Геогра-



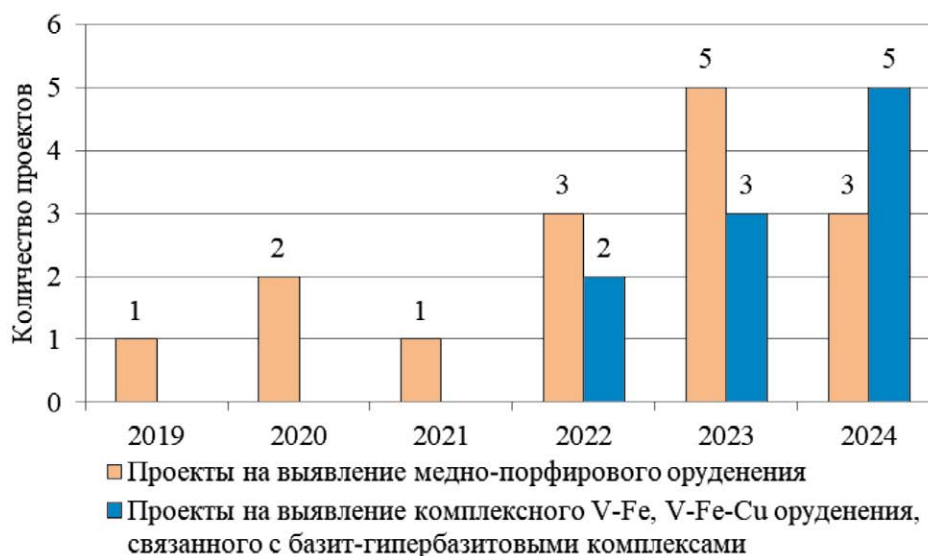


Рис. 4. Динамика представления проектов ГИН по крупнотоннажным объектам Уральского региона на государственную экспертизу

фия проектов на выявление объектов медно-порфирового семейства, сформировавшихся в различных геодинамических обстановках [2, 7], постепенно расширяется, охватывая перспективные структуры не только Южного, но и Среднего и Северного Урала. В рамках госбюджетного финансирования в 2024 году начата реализация проекта поисков медно-порфировых руд на Синарской площади (Средний Урал).

### Выводы

1. Открытия новых крупных месторождений, представленных богатыми и рядовыми рудами традиционных для Урала промышленных типов, в последние десятилетия стали крайне редкими, что создаёт почву для «пессимистичных» прогнозов касательно дальнейших перспектив развития минерально-сырьевой базы региона: «Подходит к истощению сырьевая база медных руд Урала» [8] и др. Бизнес не может больше ждать открытий новых крупных месторождений с богатыми рудами, и, работая по «новым правилам», вышел на уникальные технологии разработки руд с низким содержанием полезных компонентов, и это главное событие в новом веке на Урале [3, 4, 9]. Сегодня крупнотоннажные месторождения являются главными региональными поставщиками железных и медных руд на перерабатывающие предприятия Урала, внося тем самым весомый вклад в стабилизацию сырьевой безопасности региона и страны в целом.

2. Вовлечение в промышленный оборот запасов медно-порфировых месторождений обеспечивает рост производства меди в Уральском регионе (за истекшие 9 лет объемы добычи меди, и соответственно, производства медной продукции в регионе увеличились в 1,5 раза), а также в значительной степени определяет воспроизводство минерально-сырьевой базы Урала. Прирост запасов меди, способный компенсировать её текущую добычу, обеспечивается только крупнотоннажными медно-порфировыми и, в меньших масштабах, комплексными медно-золоторудными месторождениями.

3. Учитывая комплексный характер руд крупнотоннажных месторождений и принимая во внимание достигнутые технологические показатели их переработки, растёт значимость подобных руд в региональной (и федеральной) добыче и производстве

ряда попутных металлов, в том числе и стратегически важных (золота, серебра, ванадия и др.).

4. Экстенсивные стратегии освоения минерально-сырьевых ресурсов, которые реализуются на современном этапе промышленного развития Уральского региона, связанные с увеличением объемов добываемой и перерабатываемой рудной массы, сталкиваются с серьезными ограничениями экологического характера. Интенсификация поисков в регионе новых крупнотоннажных объектов в первую очередь должна обеспечить возможность выбора перспективных объектов, промышленное освоение которых не приведёт к существенному усугублению негативной нагрузки на окружающую среду (среду обитания человека) в условиях сформировавшихся региональных техногенно-природных ландшафтов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Крейтер В.М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Ч. 1. М.: Госгеолтехиздат, 1960. — 331 с.
- 2) Контарь Е.С., Либарова Л.Е. Металлогения меди, цинка, свинца на Урале. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. — 233 с.
- 3) Алтушкин И.А., Левин В.В., Гордеев А.И., Пикалов В.А. Особенности освоения Томинского и Михеевского меднорудных месторождений Южного Урала // Цветные металлы. № 7(919). — 2019. — С. 21–28.
- 4) Опыт освоения месторождений медно-порфирирового типа на Урале / И.А. Алтушкин, В.В. Левин, А.В. Сизиков, Ю.А. Король // Записки Горного института. 2017. — Т. 228. — С. 641–648.
- 5) Распоряжение Правительства РФ от 30.08.2022 № 2473-р «Об утверждении перечня основных видов стратегического минерального сырья». — URL: <https://docs.cntd.ru/document/351621866?ysclid=lvf22gje37931068970> (дата обращения: 22.01.2025).
- 6) О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году: Гос. доклад. М., 2023. — 640 с.
- 7) Плотинская О.Ю. Порфирово-эпитермальные системы Урала: источники вещества, эволюция и зональность / Автореф. дис. ... доктора геол.-мин. наук. М., 2023. — 39 с.
- 8) Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 июля 2024 года № 1838-р. М., 2024. — 34 с.
- 9) Виноградов А.М., Малышев А.И. Факторы и критерии прогноза, направление и методика поисков крупных колчеданных месторождений на Урале // Литосфера. — № 5. — 2014. — С. 90–109.

## НАХОДКА СПЕРРИЛИТА В СУЛЬФИДНЫХ БРЕКЧИЯХ УЧАСТКА ЖЕРЛОВЫЙ, МАЛОМУРУНСКИЙ ЩЕЛОЧНОЙ МАССИВ (РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ))

Абраменков К.С., Алферова В.А., Бондаренко Н.В., Кудрявцева О.Е.  
ФГБУ «ЦНИГРИ»

Мурунский щелочной массив располагается на северо-западной окраине Алдано-Станового щита Сибирской платформы, в области сочленения Чаро-Олекминской глыбы, которая является составной частью Олекминской гранит-зеленокаменной области, а также Березовского прогиба.

Минералогия территории, по мнению ряда авторов [1;2], связана с докембрийским этапом рудообразования с последующим мезозойским подновлением. Она определяется проявлениями мезозойского щелочного магматизма, а также месторождениями железных руд, урана, барий-стронциевых руд, проявлениями рудного золота, молибдена, титана, камнецветного сырья.

На современном эрозионном срезе Мурунский щелочной массив представляет собой три обособленных фрагмента, выходящих на дневную поверхность, с провесом кровли между ними: Большемурунский, Догалдынский и Маломурунский. Последний представляет собой полифазное лакколитообразное вулcano-плутоническое тело, в строении которого в равной степени наблюдаются интрузивные и субвулканические разности. Среди интрузивных пород представлены нефелиновые, кальсилитовые и псевдолейцитовые сиениты, а также шонкиниты, фергуситы, пироксениты. Среди изверженных и субвулканических пород отмечаются трахиты и лейцитовые фонолиты. Кроме того, фиксируются многочисленные дайки лампрофиров: биотит-титан-авгитовых минет, сельвсбергитов, тингуаитов. В северо-западной части массива располагается одноименная трубка эксплозивных брекчий.

В проекции на горизонтальную плоскость брекчиевая трубка имеет размеры около  $1,5 \times 3$  км. Ранее установлено, что трубка выражена во вторичных геохимических полях, выделяется повышенными концентрациями *Au*, *Ag*, *Pb*, *Zn*, *Mo*, *V*, *Cu*, *Bi*, *As*, а также фиксируется положительной магнитной аномалией трубчатого типа [3, 4]. Вмещающие породы представлены в разной степени измененными сиенитами и трахитами.

Предыдущие исследователи [2] выделяют три типа брекчий, отвечающие различным стадиям формирования (от ранних к поздним): с глинисто-биотит-полевошпат-эгириновым, эгирин-биотит-полевошпат-гранатовым цементом, и гидротермальные брекчии с рудно-карбонатно-кварц-флюоритовым цементом.

В результате предыдущих исследований было установлено, что золоторудную минерализацию, имеющую промышленное значение, несут гидротермальные брекчии с барит-флюорит-кварцевым цементом, с сульфидной полиметаллической минерализацией, которая составляет до 30 % объема породы. Золото обнаружено в тесной парагенетической ассоциации с пиритом, однако частично оно находится в своей свободной форме. Кроме того, именно в этих гидротермальных брекчиях был зафиксирован сперрилит ( $PtAs_2$ ).

Следует также отметить отсутствие в цементе брекчий туфового или лавового материала, что не позволяет считать их вулканическими; отсутствие структур, характер-

ных для плутонических и гипабиссальных пород, и существенную роль глинистых минералов, не свойственных эруптивным брекчиям; отсутствие в породах сланцеватости и глинки трения, часто отмечаемых в тектонических брекчиях. Перечисленные признаки рассматриваемых брекчий позволяют предполагать их эксплозивное происхождение [2]. Механизм образования ранних брекчий – скорее всего результат прорывов остаточного магматогенного флюида, а поздних – результат периодического вскипания гидротермального раствора, перемежавшегося с периодами равновесного минералообразования в жильной форме, что обусловило полиимпульсный характер брекчирования [1].

Сперрилит был обнаружен в бороздовой пробе, отобранной при проходке канавы при проведении поисковых работ на участке Жерловый, в пределах которого и находится исследуемая брекчиевая трубка. Из минералогической пробы, отобранной с продуктивного золоторудного интервала, была выделена тяжелая фракция, в которой был зафиксирован сперрилит при исследовании на электронном микроскопе с энергодисперсионной приставкой.

Сам сперрилит располагается в барит-флюорит-кварцевом цементе гидротермальных брекчий и имеет размер около 7 мкм. Он находится среди гётит-ярозитового агрегата, который, вероятнее всего, вторично замещает сульфидные минералы цемента. Также рядом с зерном сперрилита наблюдаются ксеноморфные образования барита.

Поскольку Маломурунский массив является щелочным, то остаточный флюид в значительной мере обогащен летучими компонентами, как анионами, так и катионами. Представляется, что в остаточной флюидальной массе протекает гидролиз воды по реакции (1):



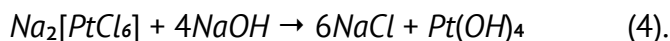
При этом следует отметить, что гидроксильная группа активно участвует в процессе прохождения флюида через вмещающие породы с образованием фемических минералов (слюд и амфиболов), которые фиксируются по зальбандам в трубке эксплозивных брекчий. При этом следует отметить, что поскольку среди летучих компонентов накапливается в значительной мере мышьяк, то происходит образование газа арсин ( $AsH_3$ ) (2):



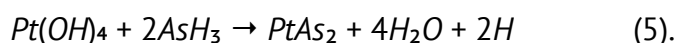
Помимо водорода, в остаточном флюиде происходит накопление галогенов, в частности  $Cl^-$ ,  $F^-$ . Параллельно с образованием арсина происходит хлорирование платины (3):



В щелочной среде, которая обусловлена геохимической спецификой Маломурунского массива, хлорид платины распадается с выделением гидроксида платины (4):



Гидроксид платины по своим свойствам является амфотерным соединением, и при наличии летучего агрессивного газа арсина формируется более устойчивая фаза в виде сперрилита (5):



В результате реакции получается восстановительная среда, которая, по нашему мнению, обеспечивает восстановление золота до его самородного состояния.

Таким образом, помимо минералогического “экзота”, присутствие сперрилита в минеральной фазе свидетельствует о резкой дифференциации глубинного магматического очага, результатом которой являются магматические фазы Маломурунского массива и вышеуказанный остаточный флюид.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Алферова В.А., Столяренко В.В., Минаева С.В., Бондаренко Н.В., Соколов Е.П. Геологическое строение Маломурунской трубки эксплозивных брекчий с наложенной золоторудной минерализацией (Республика Саха (Якутия)) / Сборник тезисов докладов XIII Междунар. науч.-практ. конф. «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов» (10–12 апреля 2024 г., Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ»). – М.: ЦНИГРИ, 2024. – 186 с.
- 2) Макарьев Л.Б., Миронов Ю.Б., Кухаренко Е.А., Шарпенко Л.Н. Брекчиевые образования в мезозойских ультракалиевых щелочных породах Мурунского магматического узла (Северное Забайкалье) // Региональная геология и металлогения № 66/2016. – С. 45–52.
- 3) Макарьев Л.Б., Митрофанов Г.Л., Митрофанова Н.Н. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Лист О-50 (Бодайбо). Объясн. зап. – СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2010. – 612 с.
- 4) Соколов Е.П. и др. Отчет о результатах работ по объекту 640-6 «Поисковые работы на рудное золото в пределах Мурунского рудного узла (Республика Саха (Якутия))». – М., 2023. – 194 с.

УДК: 550.8.028

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ФОРМАТЕ ГИС-АТЛАС И ОЦЕНКА ПОИСКОВЫХ ОРИЕНТИРОВ ПРИ ПРОГНОЗЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦЕННЫХ ВИДОВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Ажгалиев Д.К. – 1;

Нурсултанова С.Н., Абилова М.К., Жиенгалиев А.С. – 2

1 – ТОО «PetroGas WK», г. Атырау, Республика Казахстан;

2 – НАО «Атырауский университет нефти и газа  
им. Сафи Утебаева», г. Атырау, Республика Казахстан

Проведение в 2021-2023 гг. региональных картографических исследований «ГИС-Атлас карт геологического содержания Каспийского региона масштаба 1:1000 000» показало новые возможности для решения задач поисковой геологии [2]. Данные исследования в формате ГИС-Атлас ранее были проведены ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского (Санкт-Петербург) по российской части Прикаспийской впадины Каспийского региона [3]. Рассматриваемый регион представляют три осадочных бассейна в западной части Республики Казахстан (Прикаспийский, Устюрт-Бозашинский, Мангышлакский бассейны).

Как показал опыт совместных работ РФ и Казахстана, значение данных исследований в формате ГИС-Атлас не ограничивается исключительно приданием единых картографических стандартов для изучаемой территории в принципе. Учитываются различные слои информации, которые позволяют более детально рассматривать некоторые региональные геологические особенности строения и состава отложений изучаемого конкретного региона. Наряду с региональными картографическими построениями, детальный учет глубоко геологических особенностей строения является немаловажным фактором в оценке ресурсного потенциала конкретного региона. Данный фактор, в свою очередь, обусловлен, прежде всего, резким различием структурно-формационного состава разновозрастных комплексов (фундамент, промежуточный комплекс, кайнозойская толща) граничащих между собой бассейнов и отдельных крупных блоков земной коры (на примере бассейнов Каспийского региона).

Таким образом, необходимая полнота исследований определяется составлением сводного картографического материала, который при этом учитывает все основные закономерности геологического строения и развития осадочных бассейнов (крупных блоков земной коры). Это, в свою очередь, позволяет отметить и уточнить характер распространения многих видов полезных ископаемых (УВС, ТПИ, подземные воды и др.). Важным компонентом при составлении региональных картографических материалов в формате ГИС-Атлас по территории исследования, несомненно, являются данные по пробуренным глубоким и структурным скважинам, опорным сейсмическим профилям.

Результаты выполненной по Каспийскому региону работы позволили наметить и обосновать нижеследующие **основные качественные ориентиры**, которые приобретают большое поисковое значение при оценке прогнозного потенциала по разным видам минерального сырья, включая УВС, ТПИ, подземные воды и др.

1. Особенности структурного плана по отражающим горизонтам верхней части разреза кайнозойской толщи, **с акцентом на изучение строения и газоносности плиоценовых отложений неогена.**

2. Влияние т.н. «переходных зон» как областей сочленения осадочных бассейнов и крупных блоков земной коры, определяющих характер распространения ценных видов минерального сырья. **Изучение особенностей строения и распространения элементов линейной тектоники**, отражающих развитие отдельных участков и блоков на неотектоническом этапе.

3. **Детальное изучение поверхностного слоя разреза** на предмет наличия компонентов различных видов ценного сырья (ТПИ, подземные воды, редкоземельные металлы и др.) как возможности получения новой информации и маркеров, указывающих на благоприятные предпосылки и характер залегания.

4. **Оценка площадного изменения различных показателей**, которые отражают характер имеющейся фактической гидрохимической, геоморфологической, литологической и ландшафтной зональности.

5. **Оценка изменения и контрастности различных показателей** между «соседствующими» в плане крупными блоками земной коры.

*Поясним ниже более детально основные положения, на которых базируются отмеченные выше поисковые ориентиры и их определения.*

1. В связи с акцентом на изучение верхней части разреза проанализирован структурный план и региональные построения кайнозойских отложений. Были выполнены построения по предпалеогеновой (ОГ «I»), предсарматской (миоцен  $N_{1s}$ ), предплиоценовой (плиоцен  $N_2$ ) и предачкагыльской (плиоцен  $N_{2ak}$ ) поверхностям, которые отражают наиболее активные периоды развития тектоники и основные события на неотектоническом этапе формирования региона.

Верхняя «критическая» часть разреза, по опыту ранее проведенных исследований в Прикаспийской впадине, оказалась наименее изученной и в ранние периоды изучения незаслуженно лишена была должного поискового внимания. В особенности это касается северных и южных районов Каспийского региона, в которых кайнозойские отложения нередко являются продуктивными и содержат залежи углеводородов с промышленными кондициями (преимущественно скопления газа). В целом продуктивность мезо-кайнозойских комплексов в данном регионе известна давно. Этому благоприятствует закономерное наращивание мощности отложений в южном направлении. На юге Прикаспийской впадины (междуречье Урал-Волга) мощность кайнозойских отложений составляет порядка 250–600 м. Перспективность ачкагыльско-апшеронских отложений ( $N_2-Q_1$ ) в Каспийском регионе отмечена тем, что на сегодня известно более 30 структур с высокой газонасыщенностью, а на 6-ти локальных структурах выявлены залежи газа с промышленными кондициями [1, 2].

Особенно можно отметить верхнеплиоценовые отложения в междуречье рр. Урал-Волга, которые изобилуют газопроявлениями. Полное описание многочисленных естественных выходов газа и газоносности на многих структурах приводится в ряде фундаментальных работ и исследований (Айзенштадт Г.Е.-А. и др., 1967; Васильев Ю.М. и др., 1962; Волчегурский Л.Ф. и др., 1964; Джумагалиев Т.Н. и др., 1960, 1963; Кудрявцева Е.И. и др., 1960). По предварительной оценке всех результатов ранее выполненных работ, многочисленных зарубежных и отечественных публикаций сделано предположение о прямой связи неглубокозалегающих газовых горизонтов неогена в междуречье рр. Урал-Волга с объектами линзовидного и клиноформного характера [4].

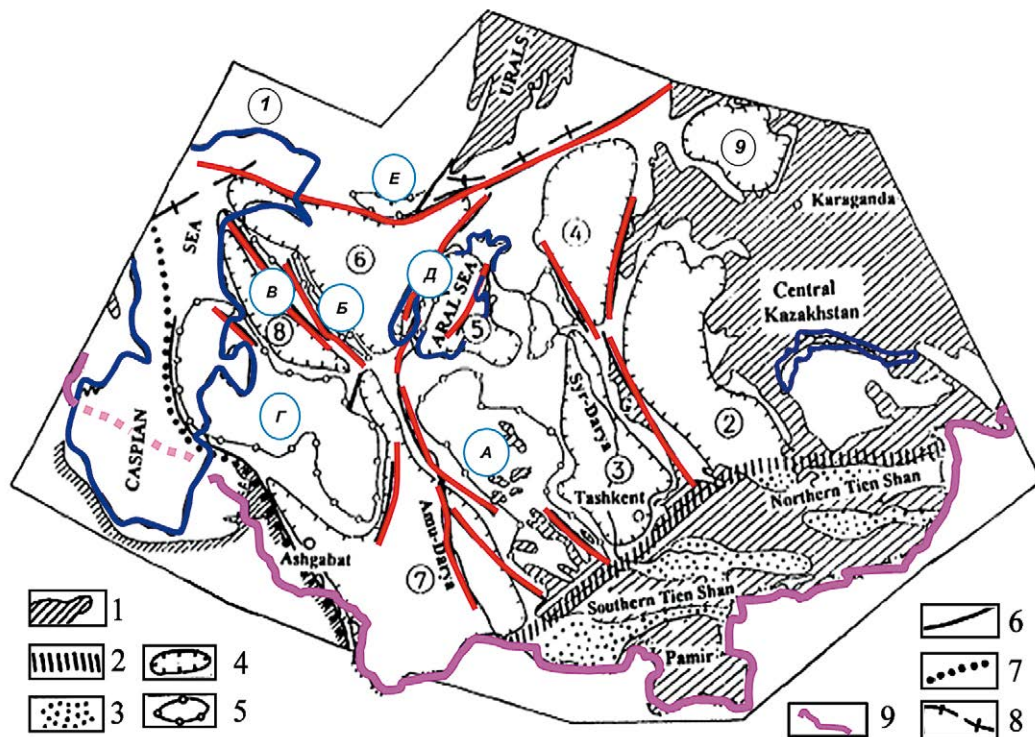


Рис. 1. Принципиальная схема основных рифтовых зон и крупных линейментов Каспийско-Арал-Амударьинского региона (по материалам интернет-ресурсов)

1 – выходы фундамента на поверхность; 2 – границы между платформами и кайнозойскими сооружениями; 3 – межгорные впадины; 4 – осадочные бассейны (1 – Прикаспийский, 2 – Шу-Сарысуский, 3 – Сырдарьинский, 4 – Южный Торгай, 5 – Аральский, 6 – Устюрт-Бозаши, 7 – Амударьинский, 8 – Мангышлак, 9 – Тенизский); 5 – основные рифтовые зоны (А – Кызылкум Центральный, Б – Устюрт Центральный, В – Мангышлак Центральный, Г – Карабогаз-Каракум, Д – Арало-Кызылкумский, Е – Южно-Эмбинский); 6 – разломы, определяющие ориентиры крупных линейментов и систем. Граница Туранской плиты: 7 – с альпийскими складчатыми сооружениями; 8 – со Скифской платформой и Уралом; 9 – южная граница СНГ

С учетом данной накопленной информации очевидна необходимость детального изучения структурных планов по горизонтам верхней части разреза кайнозоя на предмет выделения и оконтуривания ловушек нефти и газа.

2. Изучение «переходных» зон при оценке ресурсного потенциала и размещения полезных ископаемых (характер сочленения осадочных бассейнов, детализация и уточнение строения «переходных» зон между бассейнами и крупными блоками земной коры на основе анализа элементов линейментной тектоники) полагаем, имеет принципиальное значение (см. рис. 1).

Данное направление исследований представляет значительный поисковый интерес. В особенности это относится к изучению и анализу элементов (компонентов) верхней части разреза кайнозоя, что может в существенной мере дополнить и детализировать региональные построения и картографические материалы.

Учитывая результаты первых исследований ГИС-Атлас, по решению заседания XXVI сессии Межправительственного совета стран СНГ по разведке, использованию и охране недр (г. Самарканд, Узбекистан), площадь проведения совместных исследований была расширена на восток и юго-восток с охватом Аральского и Амударьинского бассейнов, которые



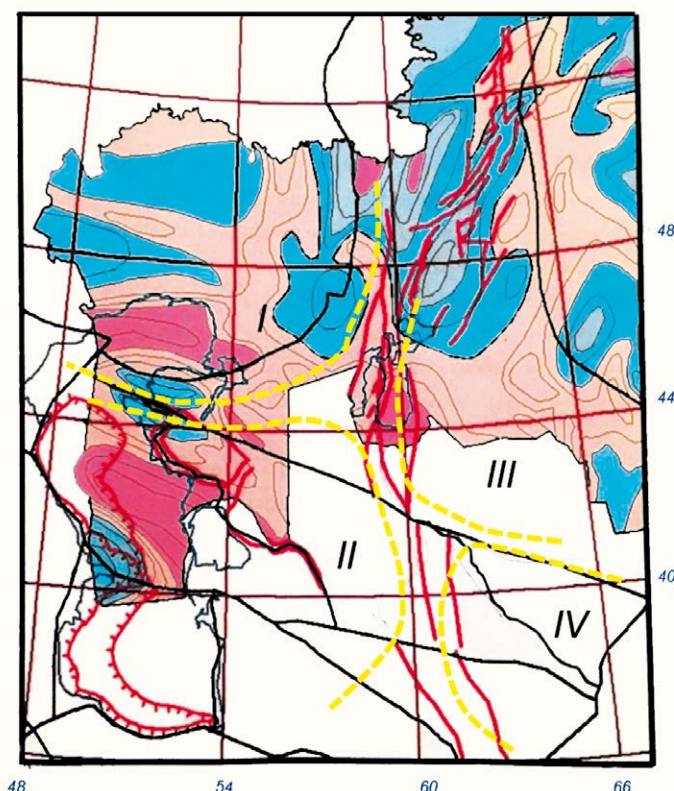


Рис. 2. Схема геотермического поля и термических аномалий (по данным Жеваго В.С., 1972 и гидро-геотермического картирования (ИГН АН КазССР, 1990))

Мегаблоки:

- I – Прикаспийский,
- II – Устьюртско-Мангышлакский,
- III – Аральский,
- IV – Амударьинский

распространяются на территорию Туркменистана и Узбекистана. В тектоническом отношении эти два южных бассейна представляют западную часть Туранской плиты [6, 8]. В итоге был утвержден и принят новый региональный картографический проект по Каспийско-Аралско-Амударьинскому региону. Общая площадь территории исследования в расширенном варианте составляет порядка 929 тыс. км<sup>2</sup>, в т.ч. Каспийская часть – 737 тыс. км<sup>2</sup>.

*Региональные особенности строения определяют основные принципы и подходы в оценке всего Каспийско-Аралско-Амударьинского региона на новом этапе исследований в формате ГИС-Атлас:*

- сравнительный анализ всех данных в части проявления и интенсивности развития различных рудоносных комплексов и нефтегазоносности;
- эпицентром является «точка» на схеме геотермического поля и термических аномалий, в которой сходятся 4 различных мегаблока (Прикаспий, Устьюрт-Бозаши-Мангышлак, Аральский и Амударьинский бассейны), которые отличаются структурно-формационным и фациальным составом разновозрастных литолого-стратиграфических комплексов (рис. 2);
- различие мегаблоков четко контролируется линейной тектоникой и переходными зонами: Арало-Кызылкумская система дислокаций (АКСД), Главный Каратауский разлом (ГКР), Северо-Устьюртская – Мангышлакская система разломов и др. Так или иначе, данные рифтовые зоны определяют региональные особенности геологического строения и, как видно, закономерности размещения различных видов полезных ископаемых (минерального сырья);
- Арало-Кызылкумская система дислокаций и разломов рассматривается как стержневой элемент в составе масштабного Арало-Космурунского линейного элемента (рифта), который находит отражение в геотермическом поле и характеризуется развитием

термической аномалии (по данным ДЗЗ (Жеваго В.С., 1972) и гидро-геотермического картирования (ИГН АН Каз. ССР, 1990).

3. Анализ характера открытых проявлений ценного сырья и рудопроявлений, состояния поверхностной части разреза также служит важным показателем для оценки ресурсного потенциала. Сведения высокой степени достоверности можно получить в результате экспериментальных определений информационных признаков современными средствами изучения глубинного строения сейсмоопасных зон и мониторинга состояния геофизических полей. В этом отношении основные направления исследований на современном этапе изучения будут связываться с проведением сейсмо-геодинамического мониторинга и режимного изучения гидрохимической зональности.

В основе данного положения лежат результаты многолетнего опыта Российской Федерации (ранее выполненные научно-исследовательские работы, направленные на снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера).

Принципиальная схема изучения характера изменения данных на контакте крупных блоков земной коры (бассейнов) включает установку режимных гидрогеологических постов и пунктов регистрации периодов сейсмической активности (рис. 3). Важным явля-

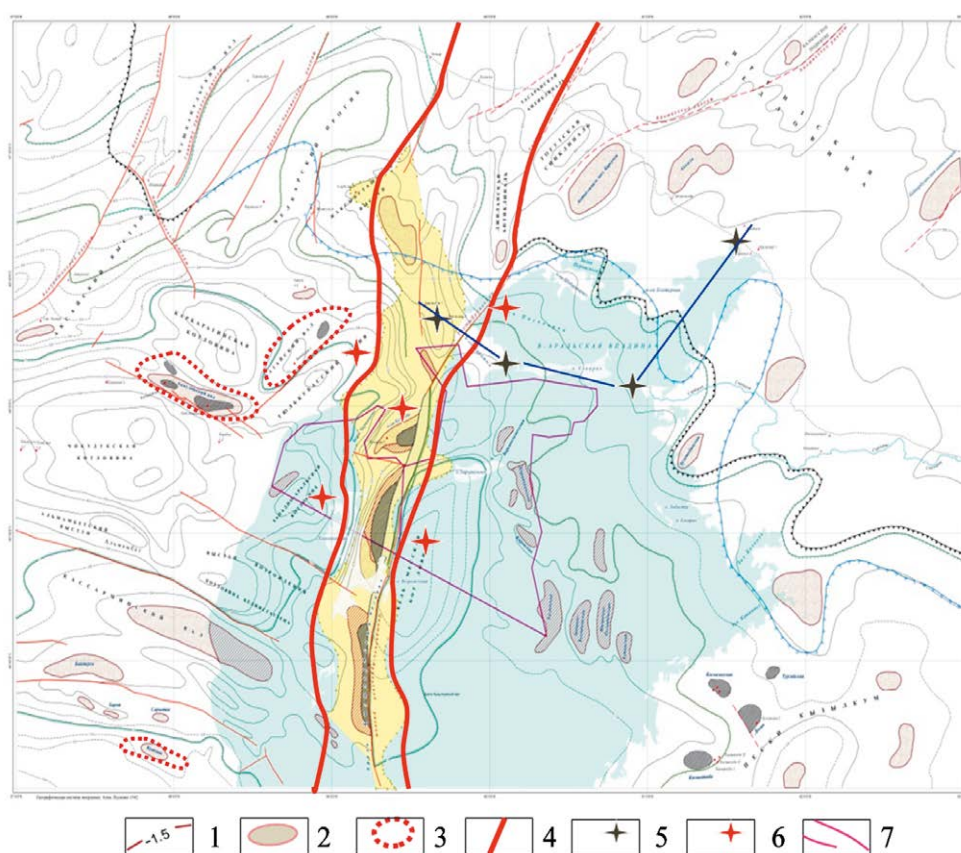


Рис. 3. Приаралье. Схема «переходной» зоны между Устьурт-Бозашинским и Аральским бассейнами (Альпаев А.А., Рабкин Ф.С., Филипов Г.П. и др. – ИГН им. К.И. Сатпаева, 1991)

1 – изогипсы по подошве отложений МЗ+КЗ (ОГ «V»); 2 – локальные структуры; 3 – ЗНГН; 4 – полоса АКСД; 5 – режимные гидрогеологические посты; 6 – пункты регистрации сейсмической активности; 7 – тектонические нарушения, определяющие положение Арало-Кызылкумской системы дислокаций (АКСД)

ется организация планомерных гидрогеологических наблюдений и геодинамического мониторинга с целью изучения состояния и зональности подземных вод по их составу.

В данном случае Аральский регион в силу специфических особенностей глубинной и площадной тектоники можно считать достаточно высокоактивным участком земной коры. Уникальность данного бассейна связывается с влиянием фактора присутствия АКСД. Земная кора на контакте Устьурт-Бозашинского и Аральского бассейнов вполне может служить в качестве примера для показательной оценки результатов учета изменений различных показателей, включая зональность подземных вод и поверхностного ландшафта, активность в подвижках верхней части разреза, закономерности распространения различных видов полезных ископаемых.

4. Оценка площадного изменения различных показателей с учетом имеющейся фактической гидрохимической, геоморфологической, литологической и ландшафтной зональности. Спектр полезных компонентов (ценное минеральное сырье) в виде выявленных россыпей, рудопоявлений, даек, площадных участков необычайно широк и насчитывает порядка 32 видов! Более того, влияние глубинных процессов, исходящих от развития и формирования АКСД, отражается на природных и климатических условиях бассейнов, что также можно отнести к результатам деятельности подземных вод и различных водоисточников открытого типа.

5. Изменение и контрастность различных показателей между крупными, контактирующими в плане блоками земной коры, характеризующими их геологическое и глубинное строение (рис. 4).

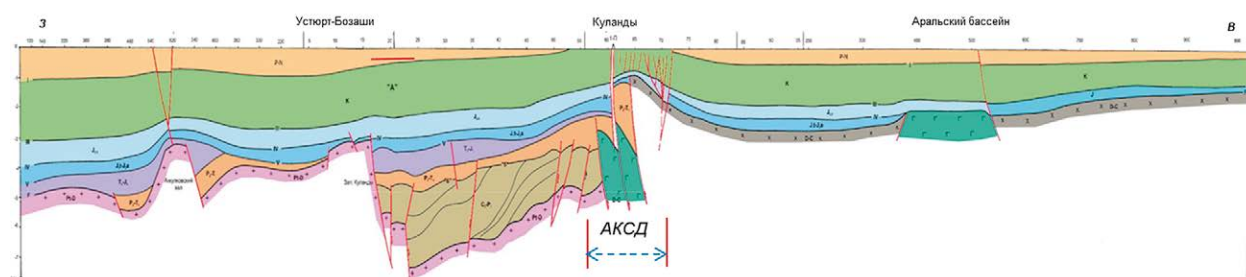


Рис. 4. Региональный геолого-сейсмический профиль Устьурт-Бозаши – Арал (по данным проекта «Комплексное изучение осадочных бассейнов РК», 2009-2013)

## Выводы и заключение

Реализация данных исследований в формате ГИС-Атлас в расширенном варианте позволит при помощи новой характеристики главных показателей и на новом, более качественном уровне рассмотреть и уточнить общий прогнозный потенциал и перспективы нефтегазоносности рассматриваемых пяти бассейнов Западного Казахстана и Туранской плиты. Для этого будут использованы уточненные на комплексной основе региональные данные о распределении углеводородного потенциала и показателей [5, 7]. В совокупности данный формат представления конечных результатов является практически новым для РК научным направлением в геологической оценке перспективных территорий.

Ожидается, что результаты данной тематики и итоги реализации обоснованных практических рекомендаций явятся стимулом для расширения и увеличения объемов ГРП по привлекательным зонам и участкам в пределах рассматриваемых бассейнов. Соот-

ветственно, это послужит благоприятным фактором в плане увеличения объема геологоразведочных работ, обеспечения необходимого эффекта, связанного с расширением рабочих мест на предприятиях промышленного сектора экономики.

Дальнейшее расширение опыта исследований на коллективной основе (участие стран-партнеров), совершенствование навыков в составлении региональной картографической основы послужит важным условием для повышения эффективности геологического изучения недр с последующим получением объективных ориентиров в направлении развития и воспроизводства минерально-сырьевой базы по определенным видам полезных ископаемых.

Унификация участниками-партнерами подходов к совершенствованию методики поисковых работ и регионального геологического изучения недр. Формирование и повышение объема экспедиционной составляющей в составе будущих потенциальных региональных проектов по составлению и обновлению картографических материалов.

Дальнейшее расширение круга первостепенных геологических задач на основе повышения уровня взаимодействия, качества и результативности совместного сотрудничества между партнерами-участниками исследований.

Таким образом, комплексные тематические исследования в формате ГИС-Атлас направлены на решение задачи расширения и воспроизводства ресурсной базы. Для этого по результатам исследований предоставляется ценная информация о верхней части разреза и недрах в целом. Данные исследования также учитывают применение инновационных подходов для создания новых технологических решений в области поисковой геологии, геохимии и нефтехимии, разведки и доразведки месторождений.

Поставленные задачи созвучны с основными направлениями, которые отмечены во всех программных документах государственного уровня, ориентированных на эффективное экономическое развитие за счет увеличения ресурсной базы (УВС, редкоземельные металлы, уран и др.). В целом, обозначаются благоприятные геолого-геофизические предпосылки для расширения объемов геологоразведочных работ и, соответственно, прогноза и обнаружения новых месторождений ценного минерального сырья.

*Авторы благодарны сотрудникам Института им. А.П. Карпинского – заместителю генерального директора по геологоразведочным работам Зубовой Т.М. и заведующему отделом четвертичной геологии и геоморфологии, кандидату геолого-минералогических наук Застрожнову А.С. за содействие в подборе материалов для обоснования поисковых ориентиров и уточнения картографических построений, в определении методики исследований и научных подходов.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Волож Ю.А., Синельников А.В., Грошев В.Г. Стратиграфия мезозойско-кайнозойских отложений солянокупольного бассейна Прикаспийской впадины // Стратиграфия. Геологическая корреляция. — 1996. — Том 4. — № 4. — С. 101–108.
- 2) ГИС-Атлас карт геологического содержания Каспийского региона масштаба 1:1 000 000. Окончательный отчет по результатам исследований за период 2021-2023 гг. Бюджетная программа 089, подпрограмма 102 (договор № 45 от 02.04.2021 г.). Гос. рег. № 4Ак, Ат, ЗКО, Мн-23-89 / 102-73. НАО «Атырауский университет нефти и газа им. Сафи Утебаева. — Атырау. — 2023. — 239 с.
- 3) ГИС-Атлас геологических карт Каспийского региона 1:1 000 000, 1:2 500 000. ФГБУ «ВСЕГЕИ». — М. — 2017.

- 4) Джумагалиев Т.Н., Мойсик Б.Г., Утегалиев С.У., Поплевин В.Ф. Геология и нефтегазоносность западной части Прикаспийской впадины // Монография. – М.: Недра. – 1970. – 176 с.
- 5) Исканиев К.О., Карабалин У.С., Ажгалиев Д.К. Комплексное изучение осадочных бассейнов – основа эффективного прогноза нефтегазоносности новых территорий // *PETROLEUM*. Аналитический журнал. 2013. – № 6. – С. 22–28.
- 6) Куандыков Б.М. Геологическое строение Арало-Каспийского региона и сопредельных районов Прикаспийской впадины в связи с их нефтегазоносностью: Автореф. дис. ... доктора геол.-минер. наук. – Алматы. – 1999.
- 7) Куандыков Б.М., Таскинбаев К.М., Трохименко М.С., Акчулаков У.А. Нефтегазоносные бассейны Казахстана и перспективы их освоения / ОО «Казахстанское общество нефтяников-геологов. – Алматы. – 2015. – 476 с.
- 8) Таскинбаев К.М., Обрядчиков О.С., Воронов Г.В. и др. Неантиклинальные ловушки нефти и газа в Республике Казахстан // Монография. НАО «Атырауский университет нефти и газа им. Сафи Утебаева». – Алматы. – 2020. – 272 с.

## 3D-МОДЕЛИ – СОВРЕМЕННОЕ СРЕДСТВО ИЗУЧЕНИЯ УСЛОВИЙ ЗАЛЕГАНИЯ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА СТАДИИ ПОИСКОВ

Бударина Т.В., Антипова А.П., Миронова Е.В.

ОП «ВНИГРИуголь» АО «СНИИГГиМС» АО «Росгеология», г. Ростов-на-Дону

Трехмерное моделирование отложений участков недр является одним из средств наглядного представления геологического строения. Трехмерные модели угольных пластов помогают изучить угленосность территории, спрогнозировать значения мощности и качества угольных пластов в межскважинном пространстве, а также оперативно рассчитать ресурсы угля.

Во ВНИГРИуголь более 15 лет выполняется геологическое моделирование угольных месторождений с применением трехмерных моделей.

Построение моделей осуществляется на основе информационной технологии, созданной во ВНИГРИуголь [1, 2]. При разработке данной технологии использован Регламент по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей для нефтяных и газонефтяных месторождений [3].

Технология предусматривает наполнение трехмерной модели геологической информацией – подготовку картографических данных, обработку и анализ результатов поисковых работ по мере поступления данных от Заказчика, по результатам анализа полученной информации выполнение многовариантного построения трехмерных моделей угольных пластов и разрывных нарушений.

Основным средством моделирования являются сеточные модели, представляющие собой связную двухмерную пространственную совокупность прямоугольных элементарных ячеек заданных размеров.

Технология реализована с помощью геоинформационной системы *ArcGis 10*, программных модулей, разработанных в ГИС *ArcView 3.2*, и фактографической базы данных по скважинам/выработкам или электронного каталога, созданных в среде *MS Access*.

Разработанная технология постоянно модифицируется при выполнении поисковых работ на конкретных участках недр в связи с различными геологическими условиями.

С 2018 по 2024 гг. построены трехмерные цифровые модели двух поисковых площадей – **Силовской** и **Нямдинской** Коротаихинского угленосного района Печорского угольного бассейна.

Угленосные площади находятся на юго-западном склоне Пай-Хоя в междуречье Хальмерью-Ярейю.

В административном отношении площади расположены на территории Ненецкого автономного округа Архангельской области и Республики Коми.

Площадь изучения Силовской площади – **139,6 км<sup>2</sup>**, Нямдинской площади – **159,4 км<sup>2</sup>**.

Ближайший крупный населенный пункт – г. Воркута (более 100 км от центра Нямдинской площади).

### Изученность

Геологические исследования района юго-западного Пай-Хоя от р. Силова-Яха до р. Нямдо-Ю были начаты в 1931 г. В 1949 г. район междуречья Янгарея и Нямдо-Ю был охвачен съёмкой масштаба 1:200 000, проведенной Н.В. Шмелевым.



В 1961-62 гг. в результате контрольно-уязочных маршрутов Н.В. Шмелевым была составлена уточнённая геологическая карта масштаба 1:200 000 для всей территории юго-западного Пай-Хоя.

С 1973 по 1976 гг. проведены буровые работы на Моретысском профиле – пробурено 17 скважин.

В 2008 г. проведены работы по геологическому доизучению в районе сочленения Полярного Урала и хребта Пай-Хой.

С 2018 по 2021 гг. выполнены поисковые работы на Силовской площади и с 2021 по 2024 гг. – на Нямдинской площади.

### **Геологическое строение**

В геологическом строении поисковых площадей принимают участие верхнепермские отложения, залегающие на палеозойских ( $O_2-C$ ) породах и перекрывающихся осадками кайнозоя.

В структурном плане поисковые площади приурочены к северо-восточному замыканию Коротаихинской мегасинклинали и располагаются в пределах Хальмерюской моноклинали Коротаихинской котловины.

Тектонические проявления представлены разрывной (надвиги, взбросо-надвиги) и пликативной нарушенностью.

Крайнюю восточную часть Силовской площади частично сечёт Нядейтинский надвиг, который далее проходит вблизи южной границы Силовской площади. Вблизи от западной границы Силовской площади от Нядейтинского надвига отпочковывается в виде апофизы состоящий из двух ветвей Нядейтинский взбросо-надвиг.

На Нямдинской площади дизъюнктивные нарушения установлены в северо-восточной части Моретысского профиля: одна группа нарушений имеет меридиональную ориентировку, другая группа – почти широтную.

В районе Моретысского профиля выделено несколько антиклинальных и синклинальных складок – брахиструктур (Корельский В.П., 1976), простирающие которых в общих чертах отвечает простираанию Пай-Хойского антиклинория. Эти складки выделяются на фоне общего моноклиналичного погружения структуры.

Площади относятся ко 2-й группе сложности геологического строения.

Угленосность поисковых площадей связана с отложениями печорской серии ( $P_{2-3pe}$ ) – сейдинской ( $P_{1-2sd}$ ) и силовской ( $P_{2-3sl}$ ) (тальбейской ( $P_{2-3tb}$ )) свит. Объектом изучения является силовская свита, которая включает в себя 5 пакетов – сверху вниз А, Б, В, Г и Д. Высокой угленосностью отличаются пакеты Б и В.

По Нямдинской площади общая мощность пластов при углах  $10-60^\circ$  изменяется от 0,05 до 4,50 м, суммарная мощность угольных пачек – от 0,05 до 4,08 м. По Силовской площади общая мощность – 0,07–5,13 м, мощность угольных пачек – 0,07–4,52 м. Угольные пласты простого и сложного строения.

В южной части Силовской площади отложения силовской свиты имеют моноклиналиное залегание с падением пород на запад под углами  $30-40^\circ$  до  $40-50^\circ$ . В северной части площади на правобережье углы падения возрастают до  $80^\circ$ , а в обнажениях по р. Силовых залегание толщи почти вертикальное (углы  $85-87^\circ$ ).

Оценка прогнозных ресурсов произведена по угольным пластам силовской (тальбейской) свиты на гипсометрических планах оценки прогнозных ресурсов, совмещенных со структурными планами масштаба 1:25 000, пакетов Б, В, Г и Д. По Нямдинской площади оценены прогнозные ресурсы по 15 пластам, по Силовской площади – по 14 пластам.

Количество апробированных прогнозных ресурсов по Нямыдинской площади составило 249 900 тыс. т, в т.ч. по категориям: по кат.  $P_1$  — 11 000 тыс. т; по кат.  $P_2$  — 138 900 тыс. т.

Количество прогнозных ресурсов по Силловской площади составило 216 100 тыс. т, в т.ч. по кат.  $P_1$  — 27 493 тыс. т, кат.  $P_2$  — 188 629 тыс. т.

Все перечисленные геологические особенности поисковых участков недр учитываются при построении трехмерных моделей.

Основным источником информации для разработки трехмерной модели участка недр является электронный фактографический и картографический каталог, в котором собирается вся первичная и интерпретированная информация — топооснова, геологическая карта, карта выходов угольных пластов под наносы, планы оценки ресурсов, геологические разрезы, а также принятые геологические колонки по скважинам, инклинометрия, результаты лабораторных анализов — показатели качества и технологических свойств угля.

На основе вышеперечисленных данных создаются цифровая модель рельефа дневной поверхности, модели геологических поверхностей и тел для создания структурно-стратиграфического каркаса цифровой модели, а также сеточные модели рабочих угольных пластов.

Для создания сеточной модели рельефа была использована топографическая поверхность, на которую была интерполирована сетка с шагом 500×500 м.

Данная модель отображает слабовсхолмленную тундру, болотистую равнину (рис. 1).

Далее выполнялось построение геологических трехмерных моделей, которые во время проведения поисковых работ постоянно перестраивались.

На основе результатов расчетов инклинометрии, полученных из фактографической части каталога по скважинам, для каждого стратиграфического слоя пород были построены трехмерные модели трасс скважин. По Силловской — 53 скважин (15 скважин текущих работ и 38 ранее выполненных работ), по Нямыдинской — 40 скважин (24 скважин поисковой стадии и 16 скважин ранее выполненных работ).

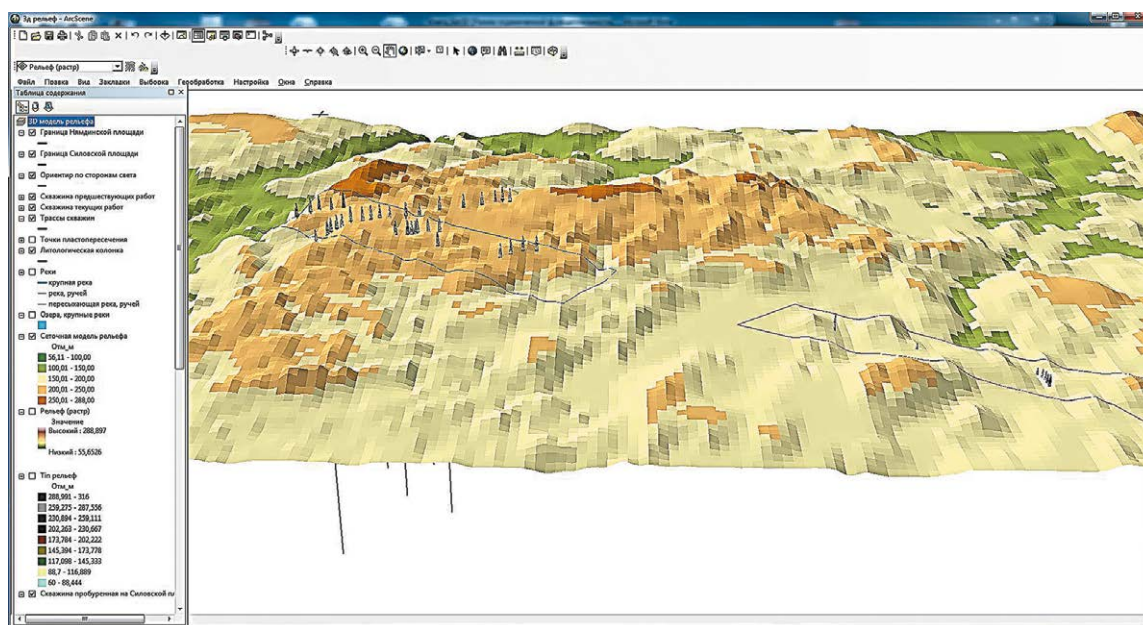


Рис. 1. Трехмерная сеточная модель рельефа района Нямыдинской и Силловской площадей (копия с экрана монитора)



Трехмерные модели разрывных нарушений строились с применением разработанных во ВНИГРИУголь программных модулей по работе с картографической частью каталога – *GeoCut* и *Geo3D* и по технологии создания *tin*-поверхностей. В результате выполненных построений создано по Силовской площади 3 трехмерных модели разрывных нарушений – Нядейтинский надвиг, I Нядейтинский и II Нядейтинский взбросо-надвиги и по Нямдинской площади – 4 разрывных нарушений (№№ 1-4 взбросов).

На основе карт выходов угольных пластов под наносы и геологических разрезов построены трехмерные модели основных угольных пластов (мощность  $>0,5$  м), которые отразили структурно-стратиграфический каркас поисковых площадей.

При построении цифровых моделей для интерполяции характеристик пласта в межскважинном пространстве применялся геостатистический метод крайгинга (кригинга). Выполнено построение интерполяционных моделей основных характеристик угольных пластов (залежей) – мощности и показателей качества угля: зольность горной и угольной массы ( $A^d$ ), выход летучих веществ ( $V^{daf}$ ), сера на сухое состояние топлива ( $S^d_t$ ), высшая теплота сгорания на сухое беззольное состояние топлива ( $Q_s^{daf}$ ) и показатель отражения витринита ( $R_o$ ) (рис. 2, 3). Данные модели используются при подсчете ориентировочного количества ресурсов, которое рассчитывается по данным в ячейках модели.

По Силовской площади построены сеточные модели следующих 15 угольных пластов: б<sub>6</sub>, б<sub>3</sub><sup>в</sup>, б<sub>1</sub>, в<sub>13</sub>, в<sub>12</sub>, в<sub>11</sub>, в<sub>10</sub>, в<sub>8</sub>, в<sub>7</sub>, в<sub>6</sub>-в<sub>6</sub><sup>в</sup>, в<sub>4</sub>, в<sub>2</sub>-в<sub>2</sub><sup>в</sup>, в<sub>1</sub>, г<sub>7</sub>, д<sub>12</sub> пакетов Б, В, Г, Д (рис. 4).

По Нямдинской поисковой площади созданы трехмерные модели 15 угольных пластов б<sub>6</sub>, б<sub>5</sub>, б<sub>4</sub>, пл. 48, пл. 47, б<sub>3</sub>, б<sub>1</sub>, пл. 44, в<sub>8</sub>, в<sub>7</sub>, пл. 41, в<sub>6</sub>, пл. 39, в<sub>5</sub>, г<sub>6</sub> пакетов Б, В, Г (рис. 5).

Для отображения полученных поверхностей в трехмерном пространстве созданы файлы – Угольные ПластыСил.sxd и Угольные ПластыНям.sxd, в которые были загружены полученные шейп-файлы. Просмотр трехмерных моделей осуществлялся в приложении *ArcScene* программного комплекса *ArcGis*.

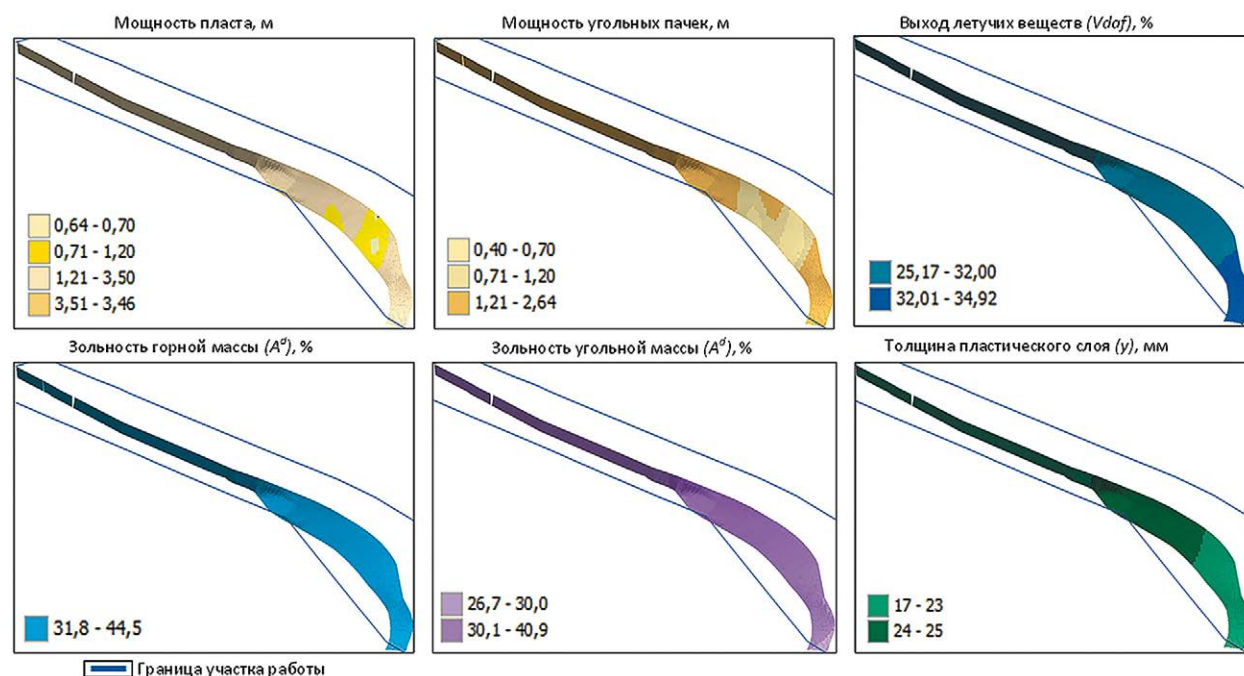


Рис. 2. Распределение параметров угольного пласта вб-вбв по сеточным моделям Силовской площади

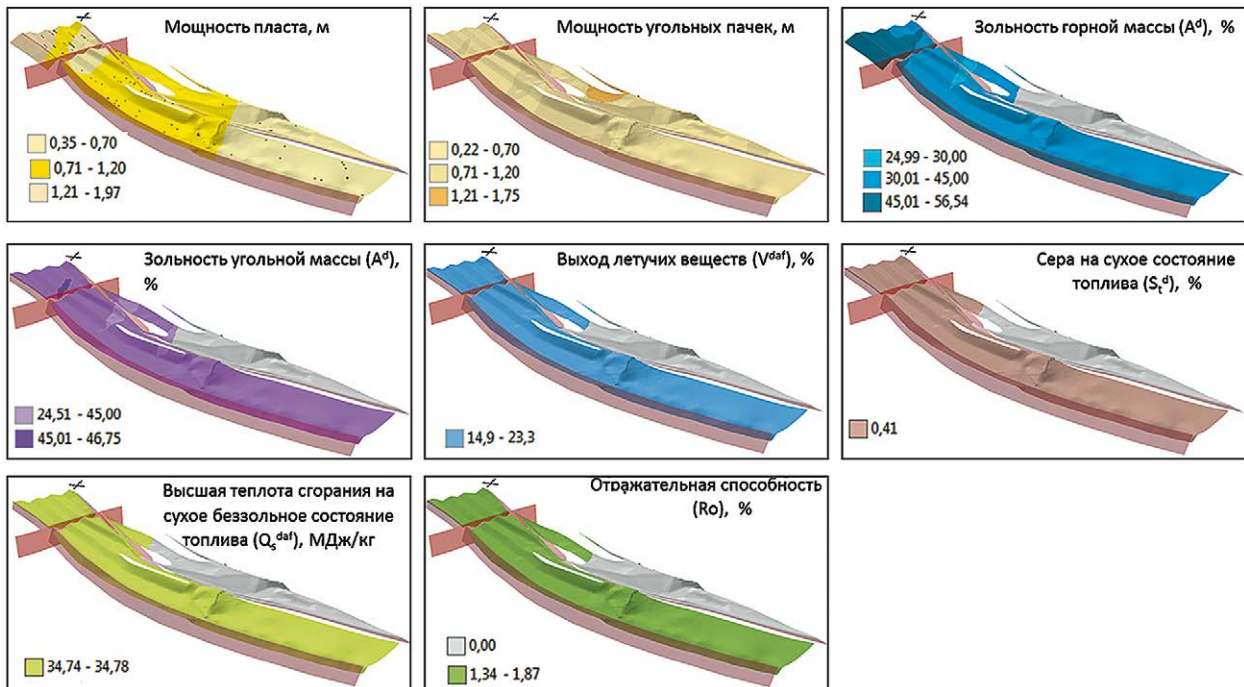


Рис. 3. Распределение параметров угольного пласта  $b_1$  по сеточным моделям Нямдинской площади  
По Сивовской площади построены сеточные модели следующих 15 угольных пластов –  $b_6$ ,  $b_3^B$ ,  $b_1$ ,  $v_{13}$ ,  $v_{12}$ ,  $v_{11}$ ,  $v_{10}$ ,  $v_8$ ,  $v_7$ ,  $v_6$ – $v_6^B$ ,  $v_4$ ,  $v_2$ – $v_2^B$ ,  $v_1$ ,  $\Gamma_7$ ,  $d_{12}$  пакетов Б, В, Г, Д (рис. 4).

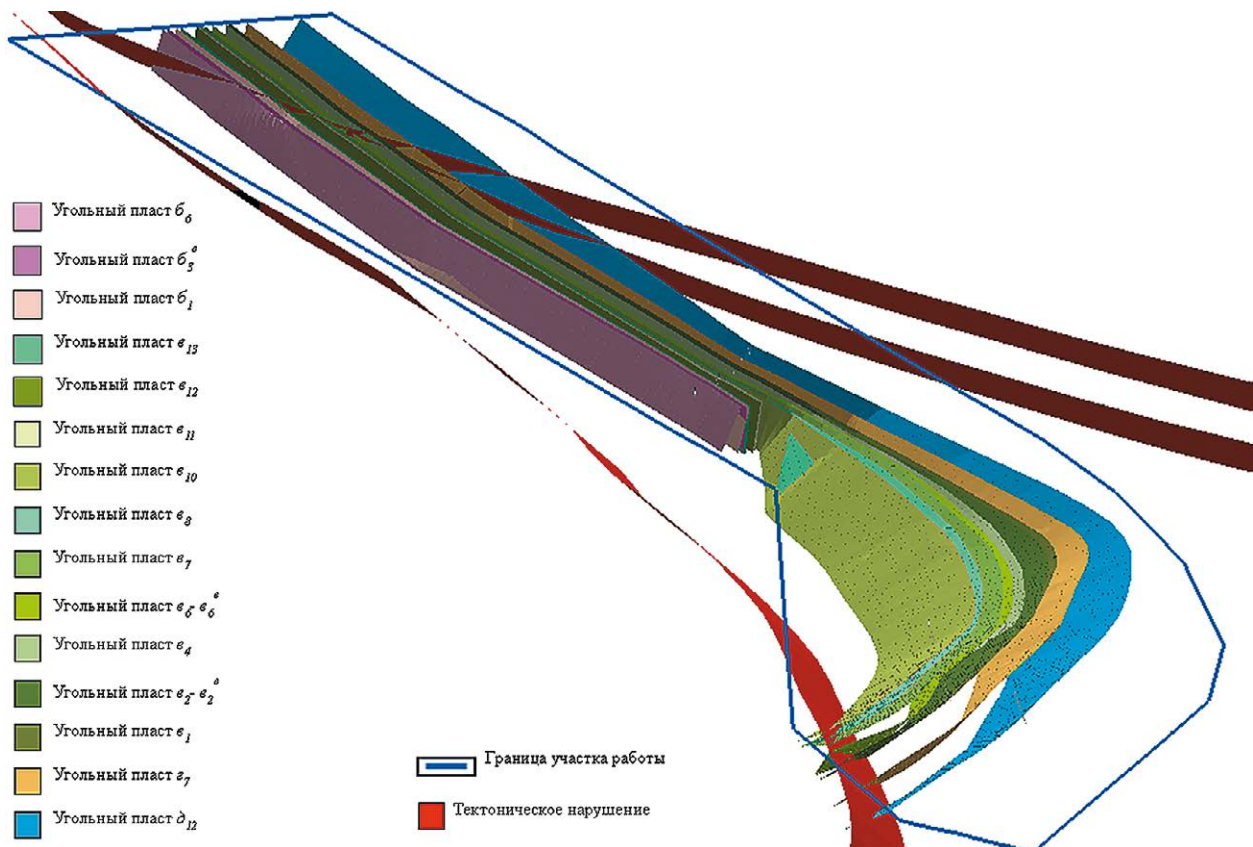


Рис. 4. Трёхмерная сеточная модель Сивовской площади

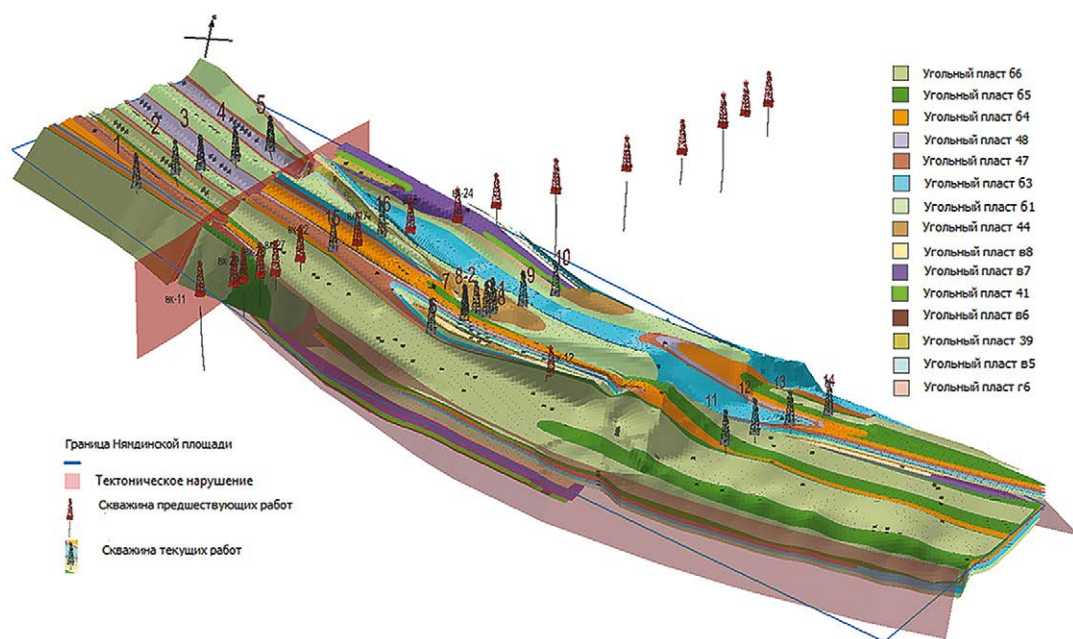


Рис. 5. Трехмерная сеточная модель Нядинской площади

В результате выполненных работ построены трехмерные модели трасс скважин, угольных пластов и разрывных нарушений. Построенные трехмерные модели позволили отобразить геологическое строение поисковых площадей в 3D.

### Выводы

Трехмерные модели обеспечивают:

- наглядное отображение поверхностей пластовых тел в 3D-формате для уточнения структуры и условий залегания угольных пластов;
- визуализацию распределений отдельных геологических параметров: мощности, зольности, выхода летучих веществ и других параметров, характеризующих угольные пласты;
- оперативное ориентировочное определение количества ресурсов угля и горной массы по угольным пластам и участку в целом для определения перспективности объекта.

Предлагается применение 3D-моделей в практику ведения ГРП в качестве вспомогательного инструмента при камеральных работах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Бударина Т.В., Журбицкий Б.И. Информационное обеспечение геологоразведочных работ на твердые горючие ископаемые // Разведка и охрана недр. 2016. – № 1. – С. 60–66.
- 2) Бударина Т.В., Антипова А.П., Миронова Е.В., Леонов С.С. Применение трехмерного моделирования на поисковой стадии геологоразведочных работ на уголь // Разведка и охрана недр. 2018. – № 4. – С. 12–18.
- 3) РД 153-39.0-047-00 Регламент по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газонефтяных месторождений. Утв. и введен в действие Минтопэнерго России приказом № 67 от 10.03.2000 г.

## **РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ ПОИСКОВОЙ СТАДИИ ГРР НА МЕДНО- НИКЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТАХ НОРИЛЬСКОГО ТИПА НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ 3D-ВП**

*Воробьев Ю.В. – 1, Банадысева М.Д. – 2, Мирошниченко Ю.В. – 2,*

*Иванов Д.В. – 1, Лапковский А.А. – 1*

*1 – ООО «Норникель Технические сервисы», г. Санкт-Петербург,*

*2 – ООО «СЗГК Геокомплекс», г. Санкт-Петербург*

### **Аннотация**

В исследовании представлены результаты апробации метода электротомографии 3D-ВП на известном медно-никелевом объекте в Норильском промышленном районе. Авторы приводят особенности методики проведения полевых работ и интерпретации полученных данных, способы трехмерной визуализации. На основе результатов опытно-методических работ сделан вывод об эффективности применения метода 3D-ВП на поисково-оценочной стадии ГРР на медно-никелевые руды. Авторами предложены для обсуждения рекомендации по расширению области применения метода и направления дальнейших опытно-методических работ.

### **Введение**

Внедрение новых методов в геолого-поисковые комплексы геологоразведочных работ это оптимизация процесса геологоразведки для повышения результативности её самой затратной части – буровых работ. Процесс внедрения нового метода проходит несколько этапов. Первый этап – это постановка геологической задачи, второй – выбор метода, решающего поставленную задачу, третий – апробация метода на эталонном объекте, на четвертом этапе – апробация на малоизученном объекте с последующей заверкой бурением. После успешного прохождения всех этапов метод, методика или технология могут быть внедрены в поисковые комплексы работ.

В исследовании представлены результаты третьего этапа работ по применению метода электроразведки 3D-ВП при поисках медно-никелевых руд в Норильском рудном районе. Работы проведены специализированным подразделением ООО «Норникель Технические Сервисы», отвечающим за разработку и внедрение новых методов ГРР, совместно со специалистами компании ООО «СЗГК «Геокомплекс» в 2023 году.

### **Постановка задачи**

В настоящее время при поисковых работах на ТПИ, согласно открытым данным опубликованных закупок крупных недропользователей, наблюдается рост объемов 3D-электротомографии методом вызванной поляризации. До настоящего момента съемки в основном проводились в варианте 2D и трехмерность достигалась путем гридирования и визуализации двумерных данных в 3D пространстве. Использование данной технологии при исследовании трехмерных объектов, а также двумерных объектов, ось которых не перпендикулярна профилю, приводит к некорректному геологическому истолкованию результатов. Проявляются искажения формы и контрастности аномалии от целевого трехмерного объекта, а также возникают сопряженные с ним ложные аномалии. Вышеперечисленные факторы существенно понижают эффективность использования метода при проектировании буровых работ.



Для учета анизотропии электрических свойств, характерной для медно-никелевых объектов, предложен метод электротомографии 3D-ВП с использованием комбинированных векторных сетей наблюдения.

### Методика электротомографии 3D-ВП

При реализации электротомографии ВП в 3D варианте измерения производились не только по профилю, на котором расположено подвижное заземление А, как при классической 2D-электротомографии, но и на четырех соседних профилях (по два профиля с каждой стороны от основного). После отработки профиля заземление перемещалось на соседний профиль и измерения производились снова. По завершении измерений по всем профилям заземление переносилось на магистраль и измерение сигнала осуществлялось в перпендикулярном направлении. Измерения по двум ортогональным направлениям реализовали векторную сеть (рис. 1). Измерения по сети северо-восточного направления названы профильными, а ортогональные – магистральными.

Шаг перемещения питающего электрода по профилям и магистралям составил 200 м, размер и шаг перемещения приемной линии – 100 м, «бесконечность» – 3 км от ближайшей приемной линии. Площадь каждого питающего заземления составила не менее 2 м<sup>2</sup>.

Для определения оптимальной методики измерений были проведены опережающие работы на опорном профиле 800. Проведено сравнение измерений ВП в частотной и временной областях; для частотной области выполнены измерения на различных частотах. Лучшие результаты получены для частоты 0,61 Гц.



Рис. 1. Схема расположения профилей, магистралей и положений проектных подвижных питающих электродов

Для проведения работ использовался комплект электроразведочной аппаратуры ООО НПК «СибГеофизПрибор» (рис. 2): генератор *SKAT-2000* и 5 измерителей *SGD-EEM «MEDUSA-B2»*. В качестве приёмных электродов в линии *MN* использовались неполяризующиеся электроды *Pb-PbCl<sub>2</sub>* производства ООО «Геодевайс» со стабильностью потенциала  $\pm 5$  мВ.

3D-инверсия проводилась в программе *ZondRes3D*. Алгоритм программы использует математический аппарат метода конечных элементов. Построение и оформление разрезов выполнялись в программе *Surfer*. Результаты трехмерной инверсии экспортированы в программу *Voxler*.

### Интерпретация

На первом этапе интерпретации по срезам и разрезам было проанализировано общее распределение электрических параметров на участке работ. Вся площадь работ разделена по электрическим свойствам на 3 блока – Северный, Центральный и Южный (рис. 3). При интерпретации проводился анализ изменения параметров внутри каждого блока.

Центральная часть участка расположена между двумя основными разломами субширотного направления. По данным работ предшественников она отличается по своим электрическим свойствам от остального участка. На срезе с 3D-модели эта зона выделяется пониженным удельным сопротивлением (УЭС).

Воздействие тектоники определяется повышенным напряжением пород, которое создается посредством давления соседних блоков, что приводит к повышению локализации тектонических нарушений. Согласно скважинным данным прослеживается тенденция повышения трещиноватости пород и роста ее степени при приближении к разлому с севера. Осложняющим фактором при интерпретации является наличие нескольких интрузий (*βT<sub>10g</sub>*). В пределах участка работ на основе геологической карты выделяется две системы разломов – субширотного и субмеридионального направлений. Развитие трещиноватости создало возможность высокоминерализованным водам проникать в горные породы, что привело к повышению проводимости геологических комплексов.

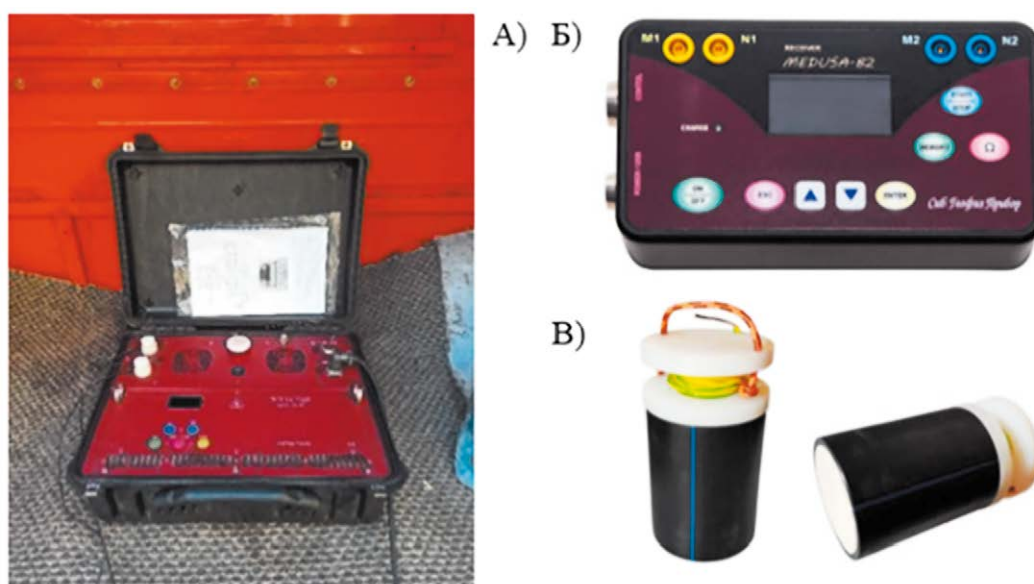


Рис. 2. Электроразведочная аппаратура: А) Электроразведочный генератор тока *SKAT-2000*, Б) Электроразведочный измеритель *SGD-EEM «MEDUSA-B2»*, В) неполяризующиеся электроды *Pb-PbCl<sub>2</sub>*

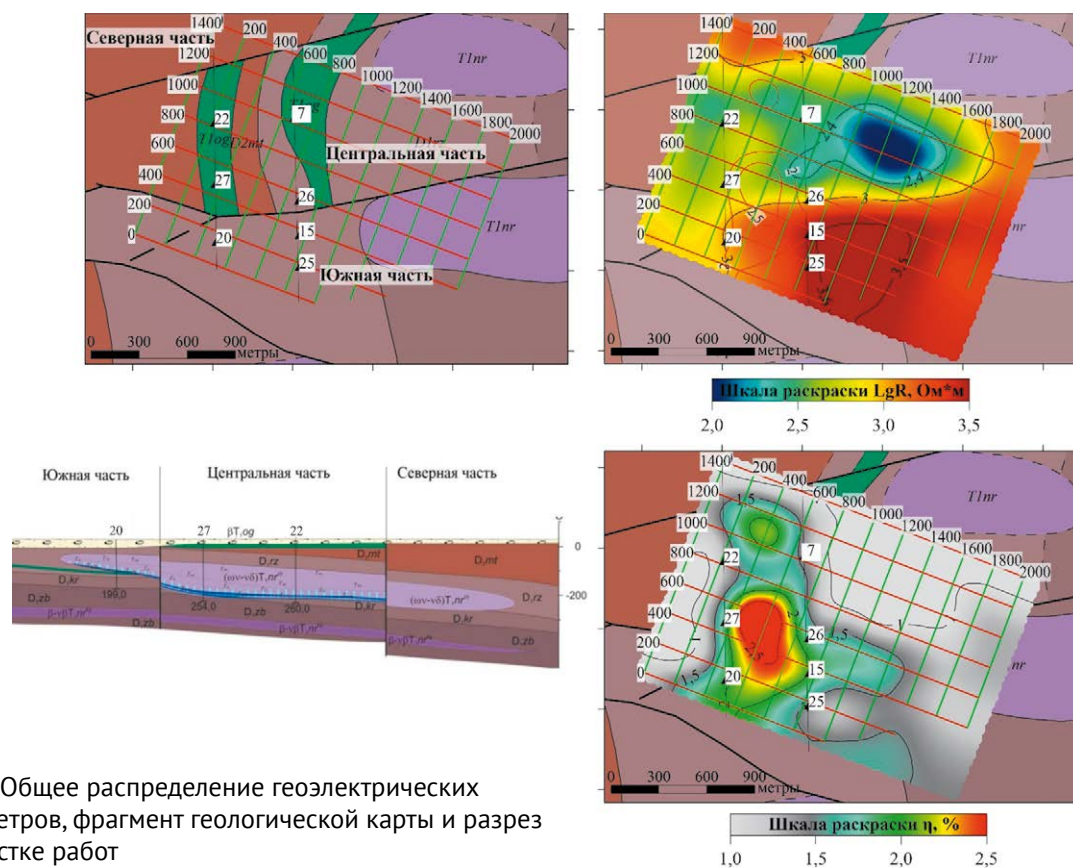


Рис. 3. Общее распределение геоэлектрических параметров, фрагмент геологической карты и разрез на участке работ

На следующем этапе проводился анализ изоповерхностей на 3D-модели совместно с анализом положения и вида основных аномалий на срезах и разрезах.

Итоговая 3D-модель (рис. 4) состоит из нескольких изоповерхностей, разделенных по определенным значениям параметров поляризуемости и сопротивления, ограниченных в пространстве. Изоповерхности для вмещающих пород поделены на относительно высокоомные и проводящие, а для интрузий были разделены в соответствии с предполагаемым

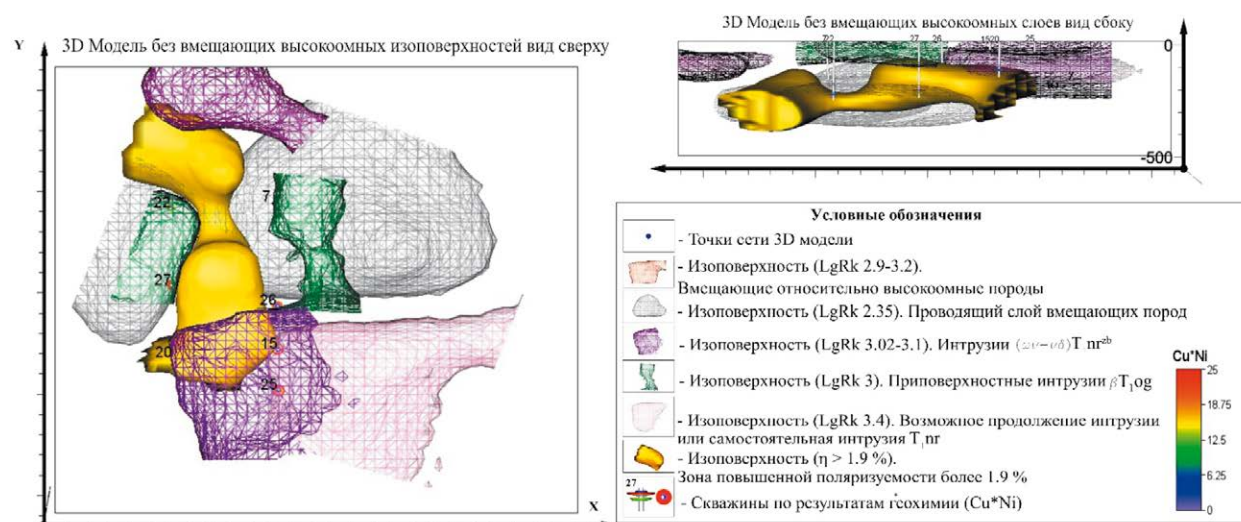


Рис. 4. Итоговая 3D-модель



составом. Изоповерхность кажущейся поляризуемости ( $\eta > 1,9\%$ ), которая оконтуривает зону вкрапленного сульфидного оруденения, выделена сплошной изоповерхностью.

#### Северная часть

Северная часть интрузии выделяется на 3D-модели изоповерхностью со значением  $LgR \sim 3,1 \text{ Ом*м}$ . На горизонтальных и вертикальных срезах с 3D-модели (рис. 5) в районе пикета 1200 локализована зона сульфидизации, приуроченная к подошве северной ветви интрузии.

#### Центральная часть

В центральной части (рис. 6) целевая интрузия выделяется на 3D-модели повышенными значениями сопротивлений относительно проводящего слоя вмещающих пород и маркируется разрывом проводящей области. Область аномальных значений поляризуемости, согласно скважинным данным, пространственно приурочена к подошве интрузии (рис. 7) и соответствует рудным пересечениям.

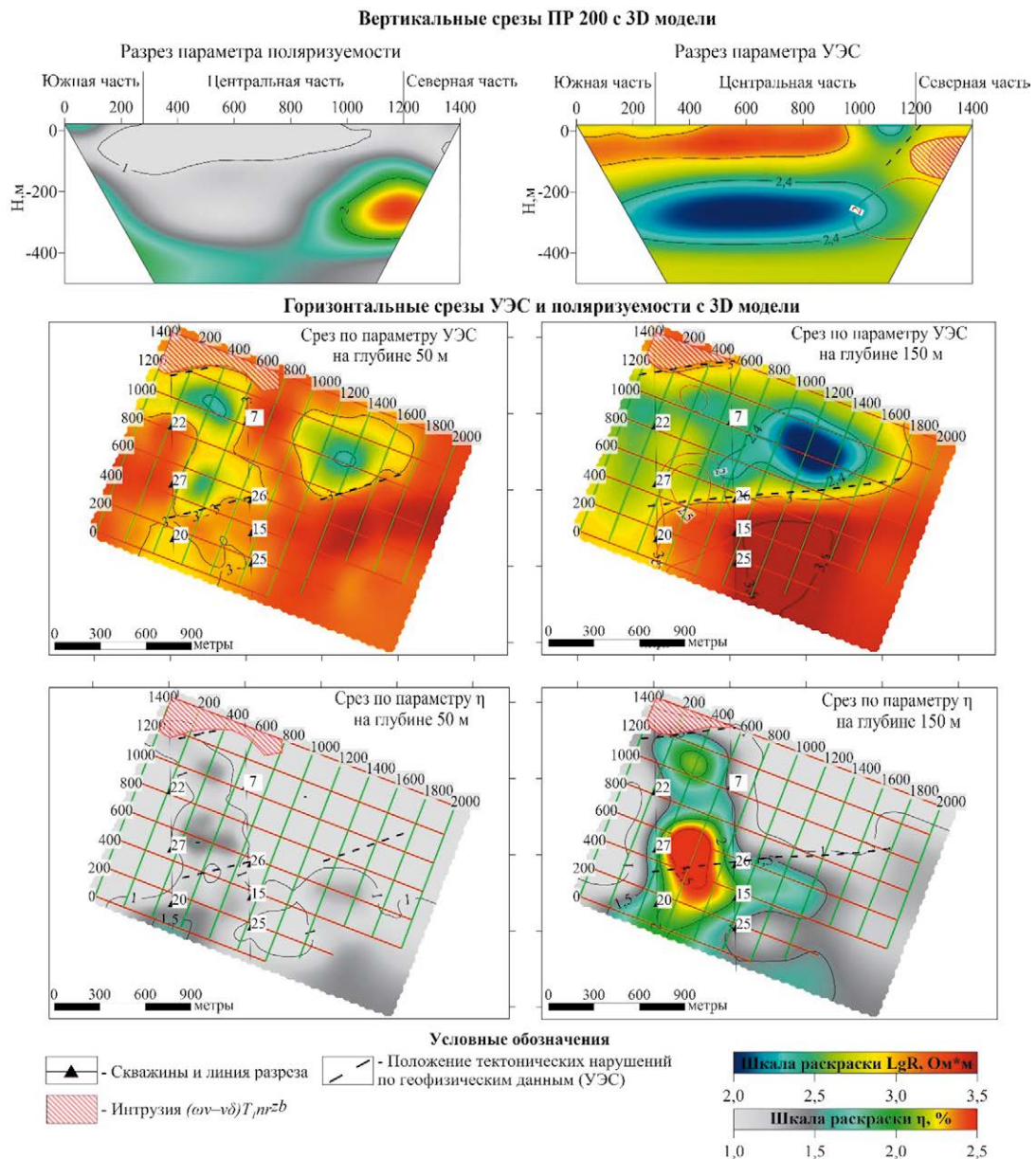


Рис. 5. Горизонтальные и вертикальные срезы 3D-модели. Интерпретация по Северной части



Рис. 6. Фрагмент 3D-модели Центральной части интрузии

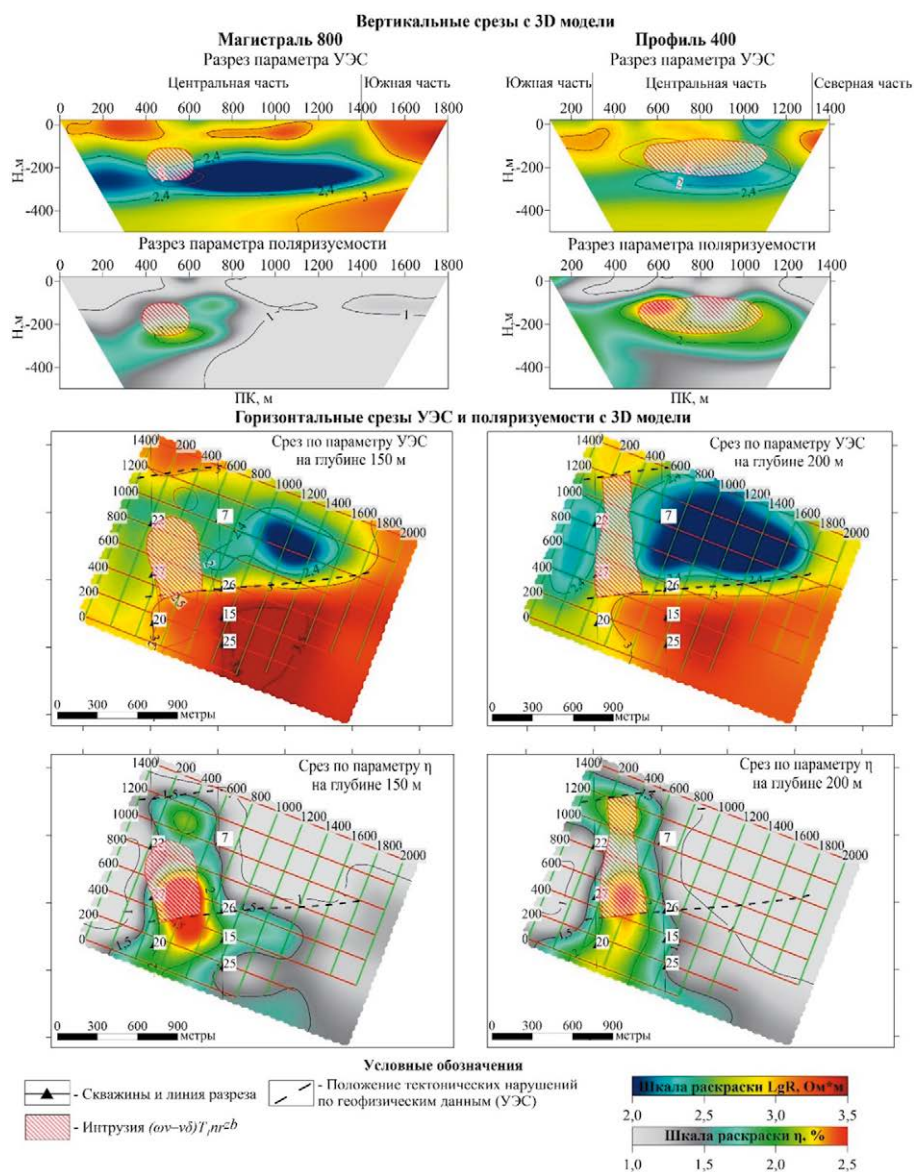
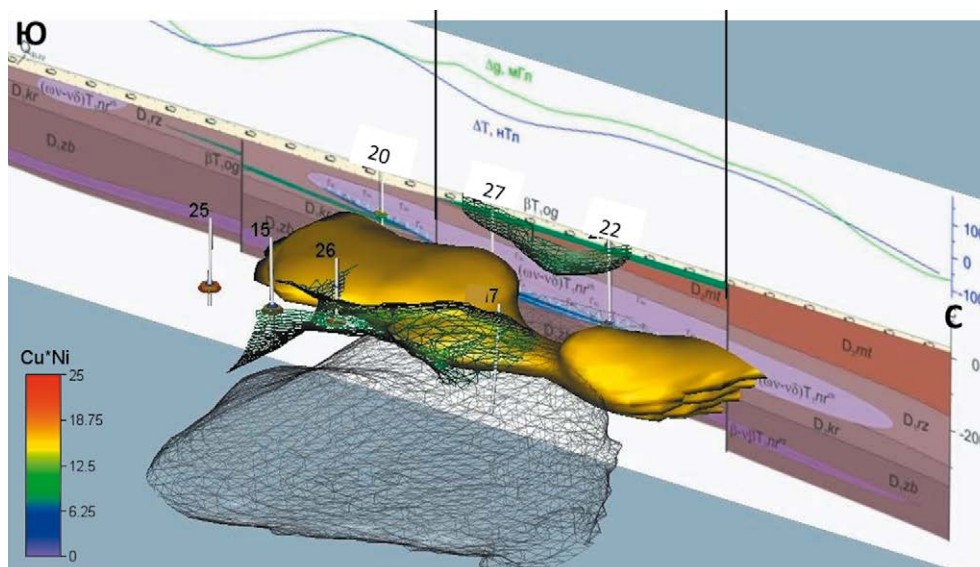


Рис. 7. Горизонтальные и вертикальные срезы 3D-модели. Интерпретация по Центральной части интрузии

### Южная часть

В южной части на 3D-модели (рис. 8) было выделено две зоны повышенных сопротивлений, предположительно отвечающие двум интрузивным объектам. Изоповерхностью ( $LgRk = 3,4 \text{ Ом*м}$ ) выделяется возможное продолжение интрузии или самостоятельная интрузия  $T_{1n\Gamma}$ . При совместном анализе 3D-моделей сопротивления и поляризуемости видно, что к высокоомной зоне приурочена зона повышенной поляризуемости (желтая изоповерхность, рис. 9). В южной части интрузия ( $\omega u-u\delta$ )  $T_{1n\Gamma}^{zb}$  выделяется высокоомной аномалией ( $LgR$  от 3 до  $3,4 \text{ Ом*м}$ ), в основании которой находится аномалия поляризуемости, маркирующая зону сульфидной минерализации ( $n > 2\%$ ).

### **Результаты**

Методом электротомографии 3D-ВП по параметру сопротивления выделены и ранжированы интрузивные тела, локализована и геометризована аномалия поляризуемости, соответствующая зоне сульфидной минерализации. Выделенные объекты коррелируют со скважинными данными. Помимо известных рудных тел, выделены новые участки, перспективные на обнаружение богатых медно-никелевых руд.

Оценены трудозатраты на проведение полевых работ. Они составляют при описанной методике измерений 21 рабочий день при численности отряда 10 человек на площадь участка 2,7 кв. км.

### **Дискуссия**

#### *Оптимальные условия для применения 3D-ВП*

Оптимальные условия применимости метода 3D-ВП определяются особенностями распределения рудной минерализации и морфологией исследуемых рудных объектов. Для объектов, имеющих в целом изотропные свойства рудных включений — случайная форма и ориентировка, равномерная плотность распределения в пространстве по разным направлениям, а также объектов, имеющих простую линейную или пластовую форму рудных тел, целесообразно применение существенно менее трудозатратного метода 2D ЭТ-ВП. Особенности тел медно-никелевых руд норильского типа являются: анизотропное распределение в породе рудной, преимущественно халькопирит-пирротиновой минерализации; закономерная ориентировка пирротин-халькопиритовых сростков, связанная с особенностями кристаллизации расслоенных интрузий; специфическая морфология рудных тел, обусловленная изменением различных характеристик по латерали, по простиранию и в вертикальном разрезе. Особенности руд норильского типа и, как следствие, анизотропия их электрических свойств при применении метода 2D ЭТ-ВП негативно влияют на сходимость результатов съемок с различными ориентировками и параметрами сети наблюдений. 3D-ВП предлагается как оптимальный метод электроразведки на этапе детализации ранее выявленных рудных тел для корректировки поисково-оценочного и разведочного бурения.

#### *Влияние рельефа*

На практике при применении метода 2D ЭТ-ВП точность инверсии понижается при проведении работ в условиях перепадов высот, когда они сопоставимы с параметрами сети наблюдения. Результат съемок, проводимых в подобных условиях, как правило, считается заведомо некорректным. Влияние рельефа на результаты съемок 3D-ВП изучено недостаточно, опытно-методические работы на медно-никелевых объектах норильского типа проводились в равнинных условиях. Дальнейшее развитие метода 3D-ВП потребует опытно-методических работ в условиях расчлененного рельефа.

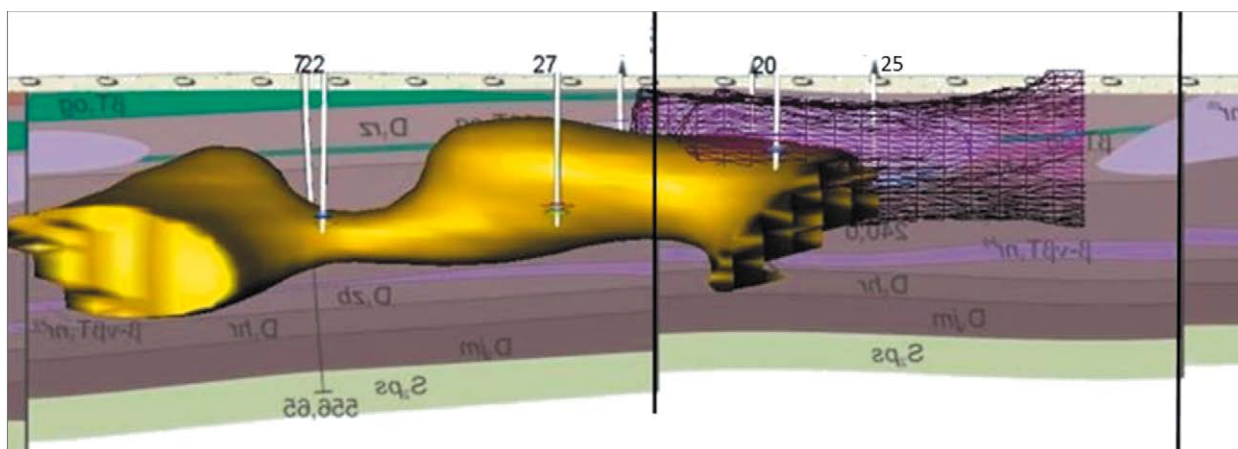


Рис. 8. Фрагмент 3D-модели. Южная часть интрузии

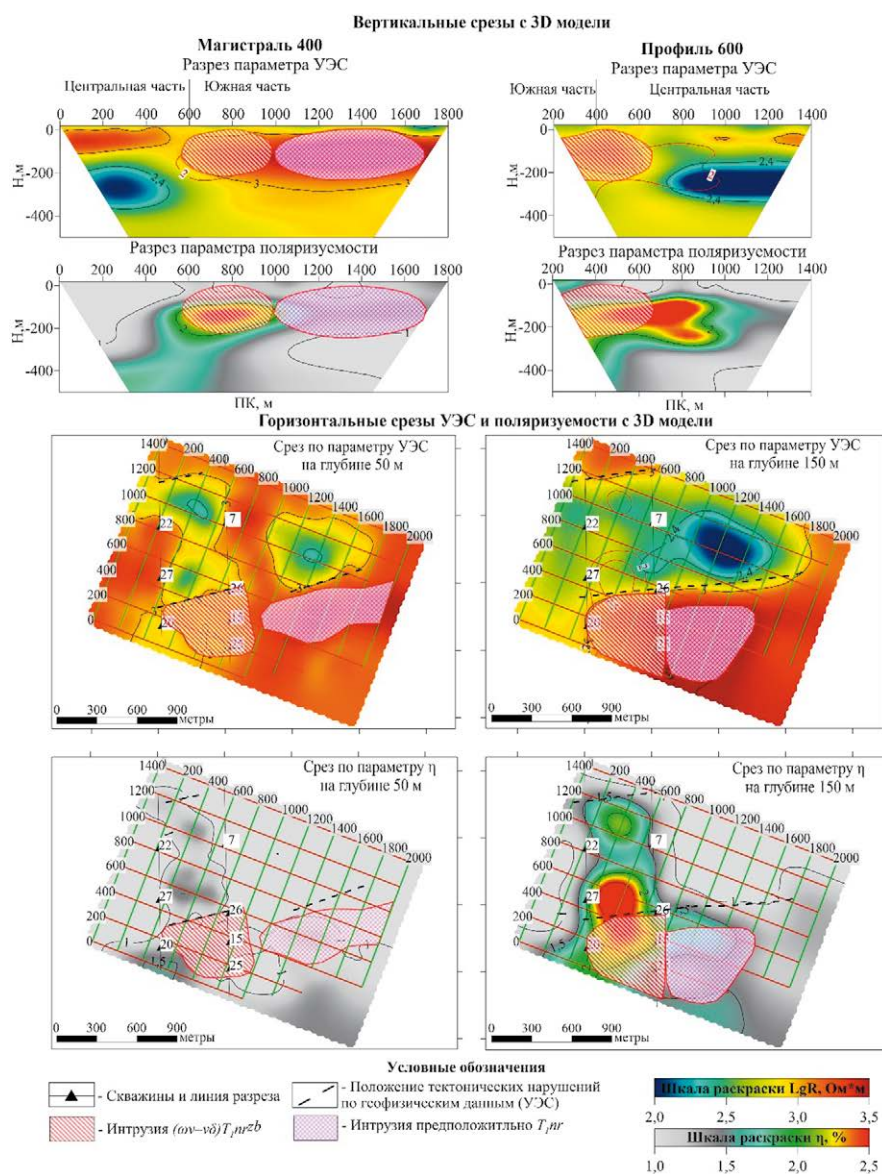


Рис. 9. Южная часть интрузии

### *Верификация результатов съемок*

Результаты детальных работ методом 3D-ВП в Норильском рудном районе верифицированы объективными скважинными данными, в том числе скважинной геохимией, установлен вещественный состав рудной минерализации (магнетит, пирит, пирротин, халькопирит) и его связь с измеренным полем. Такой подход к верификации результатов съемок 3D-ВП предлагается использовать при дальнейшем проведении опытно-методических работ, то есть эталонные объекты для аналогичных работ должны иметь достаточную степень изученности – скважинные пересечения рудных тел, характеризующие их геометрию и вещественный состав.

### *Объекты исследования*

Применение метода 3D-ВП не ограничивается медно-никелевыми объектами и сходными с ними по электрическим свойствам медно-колчеданными. Для эпитермальных месторождений часто существуют аналогичные ограничения для применения 2D ЭТ-ВП, связанные с особенностями распределения аномалообразующей рудной минерализации. Опытные-методические работы на таких объектах не проводились. Их проектирование предлагается производить с учетом фактической пространственной геохимической зональности, изученной не только в плане, но и на глубину. Для эпитермальных объектов в большинстве случаев из-за малой мощности рудных тел потребуется применение более детальных сетей, что понизит производительность съемки методом 3D-ВП и увеличит стоимость работ в расчете на 1 кв. км.

### **Заключение**

Первый шаг в реализации электротомографии 3D-ВП при поисках медно-никелевых руд сделан. Применение метода на поисковых площадях в ближайшей перспективе может стать ключом к открытию новых месторождений в Норильском промышленном районе.

Авторы надеются, что полученные результаты исследований и перспективы применения метода для других типов месторождений послужат драйвером развития электротомографии 3D-ВП.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ В ОБЛАСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

Глушкова Т.А. – 1, Перелыгин Д.В. – 2,

Мирошниченко И.В. – 1,

Талалай А.Г. – 1, Шинкарьук И.Е. – 1

1 – ФГБОУ ВО «УГГУ», г. Екатеринбург,

2 – АО НПП ВНИИГИС, г. Октябрьский

Современные требования к качеству минерального сырья базируются на точном анализе, учитывающем характерные особенности состава и структуры веществ. Требования к качеству минерального сырья регламентируются ГОСТами, ОСТами, ТУ, методическими и нормативными документами Росстандарта, Минприроды России и других заинтересованных организаций. Среди основных областей стандартизации в сфере геологического изучения недр и воспроизводства МСБ – метрологическое обеспечение и подтверждение соответствия. Процедура подтверждения соответствия (сертификация) предусматривает ряд обязательных операций. Наиболее важной из них является испытание – техническая операция, заключающаяся в определении одной или нескольких характеристик данной продукции, процесса или услуги в соответствии с установленной процедурой (Руководство ИСО/МЭК 2). Исследование качества минерального сырья в целях сертификации необходимо проводить в аккредитованных (аттестованных) аналитических и испытательных лабораториях.

Авторами создана современная лабораторная база, а наличие специалистов высокого класса практически по всем видам минерального сырья, огромные минеральные богатства Урала и опыт, накопленный при исследовании и использовании – все это способствует развитию системы оценки минерального сырья, а следовательно, и повышению его качества, ответственности производителей и безопасности потребителей.

Для решения технологических, экологических, научных и других задач разработаны методики количественного определения элементов в различных объектах окружающей среды с использованием рентгенофлуоресцентного сканирующего кристалл-дифракционного спектрометра «Спектроскан».

*Методика безэталонового рентгеноспектрального анализа руд цветных, черных, благородных и редких металлов, неметаллических полезных ископаемых, а также продуктов их переработки (концентратов, промпродуктов, хвостов и т.д.)* предназначена для экспрессного определения содержаний химических элементов в любых объектах без применения стандартных образцов, нижний предел количественного определения для различных элементов лежит в интервале 0,01–0,1 мас. %.

*Методика определения золота в рудах, порошках* предназначена для экспрессного определения Au ( $Z=79$ ) в горных породах методом рентгенофлуоресцентного анализа. Концентрацию растворенных форм золота определяют из растворов, полученных после разложения (вскрытия) породы (руды).

*Методика определения тяжелых металлов в водах при анализе на сорбционных целлюлозных ДЭТАТА-фильтрах* предназначена для экспрессного определения содержания



тяжелых металлов в питьевых, природных и сточных водах  $Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, V, Bi$ , диапазон измеряемых концентраций – 0,005–1,0 мг/дм<sup>3</sup>.

*Методика определения содержания металлов в порошковых пробах почв ( $Mn, Cr, Fe, Ni, Co, Cu, Pb, Zn$ ).*

*Методика определения содержания тяжелых металлов в воздухе рабочей зоны ( $Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, V, Bi$ ), предел обнаружения до 0,000001 % (10 мкг/дм<sup>3</sup>).*

*Методика определения химических элементов в материалах керамической промышленности.* Нижний предел обнаружения для элементов с атомным номером  $Z < 19$  составляет 0,01 %, для остальных – 0,00005–0,001 %.

*Методика определения химических элементов в материалах стекольной промышленности.* Нижний предел обнаружения для элементов с атомным номером  $Z < 19$  составляет 0,01 %, для остальных – 0,001 %.

*Методика рентгенофлуоресцентного анализа руд цветных, черных, благородных и редких металлов, неметаллических полезных ископаемых, а также продуктов их переработки (концентратов, промпродуктов, хвостов и т.д.).*

*Методика рентгенофлуоресцентного анализа горных пород.*

Все методики снабжены стандартными образцами, необходимыми расходными материалами и вспомогательным оборудованием.

Среди комплекса физических методов анализа большое значение имеют ядерно-физические методы, которые при анализе различных объектов окружающей среды целесообразно комплексировать [1-3].

С учетом опыта работы и практических результатов, полученных на ряде объектов, достаточно оптимальным, на наш взгляд, является сочетание радиометрического, рентгеноспектрального и нейтронного активационного методов анализа. Методы дополняют друг друга при необходимости анализа проб в широком диапазоне концентраций определяемых элементов (от  $10^{-6}$  до  $10^{-10}$ ). Такое комплексирование позволяет существенно расширить диапазон концентрации определяемых элементов и решать задачи с минимальными затратами средств, сил и времени. Разработанные к настоящему времени аналитические комплексы, включающие аппаратно-программные и методические решения, позволяют успешно решать задачи по исследованию элементарного состава горных пород, руд и отходов промышленных производств различного типа (в том числе на уровне микропримесей), а также задачи экологического мониторинга, в том числе радиоэкологического, при этом объектами анализа являются почвы, вода и воздух.

Ядерно-физические методы анализа в значительной степени дополняют и расширяют возможности других, широко практикуемых химических, физических и физико-химических методов. К настоящему времени при решении проблем анализа различных материалов и объектов методами ЯФМА получены существенные результаты:

- число определяемых элементов в некоторых методах достигает 50-60 и более (нейтронный активационный);
- предел обнаружения по отдельным элементам составляет  $n \cdot 10^{-10} - n \cdot 10^{-12}$  г, что соответствует при навеске в 0,1–1 г содержанию  $n \cdot 10^{-8} - n \cdot 10^{-10}$ ;
- достаточно высокая экспрессность анализа. Определение, как правило, длится не более 10-15 минут;
- высокая производительность. Средняя производительность для некоторых методов составляет десятки и даже сотни тысяч элементопределений в год;
- достаточно низкая трудоемкость;



- возможность проведения элементарного анализа разнообразных объектов в широком диапазоне концентраций без существенного изменения методики;
- возможность проведения анализа в условиях передвижных полевых лабораторий, а также непосредственно в естественных обнажениях, на отвалах промпредприятий, хранилищ различных материалов, отходов и т.п.

Ядерно-физические методы анализа (нейтронный активационный, гамма-спектрометрический, гамма-абсорбционный, рентгенофлуоресцентный (рентгеноспектральный и рентгенорадиометрический) служат эффективным средством получения информации о вещественном и элементном составе самых различных объектов окружающей среды. Ведущее положение среди лабораторных методов занимают нейтронный активационный и рентгеноспектральный методы анализа.

При элементном анализе ядерно-физические методы наиболее эффективны при определении содержания тяжелых и вредных металлов, относящихся к разным группам опасности химических веществ: *As, Ci, Hg, Pb, Se, Zn, P, Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr, V, W, Mn, Sr* и др., а при оценке радиационного фактора эти методы просто незаменимы. Разработанные методики позволяют определять широкий круг элементов на уровне ПДК и ниже в таких объектах, как почвы, отходы промышленных производств, воздух, питьевая, природная и сточная очищенная воды и др., а также в горных породах, рудах.

Техногенное загрязнение окружающей среды, принимающее с каждым днем все большие масштабы, приводит к активизации деятельности исследователей и расширению круга методов, традиционно используемых при решении экологических задач. Это объясняется как стремлением исследователей «расширить сферу влияния», найти новое применение своим силам и знаниям, так и развитием соответствующей аппаратно-методической базы и организационной структуры.

В настоящее время разработана передвижная аналитическая лаборатория в специализированном мобильном вагончике, как в автомобильном, так и гусеничном вариантах (рис. 1).

Ядерно-физические методы анализа (ЯФМА) нашли свое место и успешно используются для решения различных задач в геологии, экологии, металлургии, строительстве, машиностроении, медицине, ветеринарии, пищевой, химической, горнодобывающей и горноперерабатывающей промышленности и др. Объектами анализа ядерно-физичес-

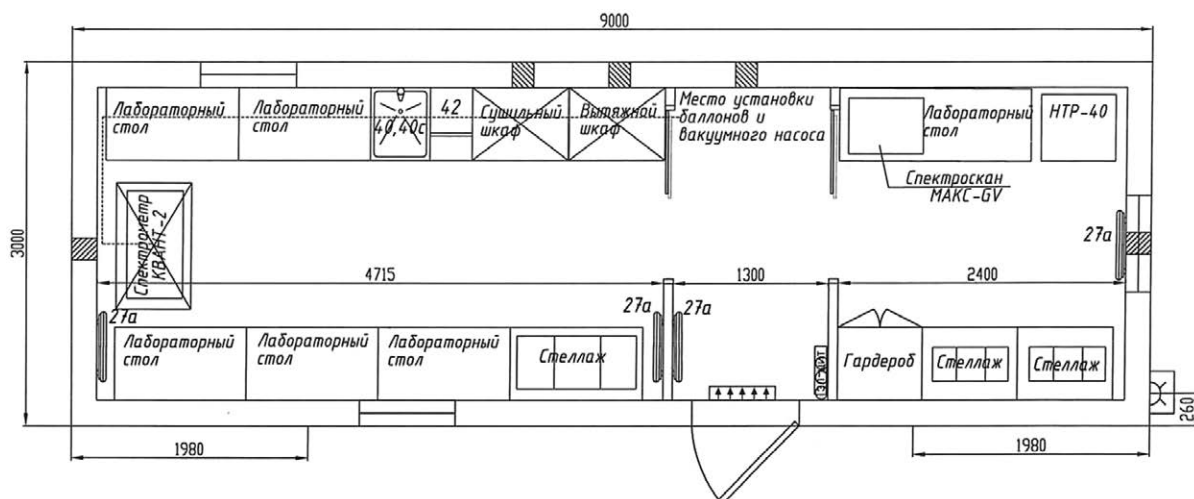


Рис. 1. План мобильной аналитической лаборатории

ких методов являются: воздух, вода, почвы, горные породы, руды, продукты и отходы их переработки и др.

Рассматривая методы и средства ядерно-физического анализа с точки зрения наиболее общих положений и критериев, определяющих анализ как источник информации, можно выделить следующие особенности и достоинства:

- высокая экспрессность и избирательность, хорошая и достаточная воспроизводимость для решения многих задач;
- элементный анализ по характеристическому рентгеновскому излучению (качественная идентификация элементов) несложен благодаря относительной простоте рентгеновских спектров;
- анализ является неразрушающим, материал образца полностью сохраняется в процессе анализа;
- анализируемое вещество может находиться в любом агрегатном состоянии: твердом, жидком, газообразном;
- требования, предъявляемые к подготовке образца, как правило, достаточно просты: можно анализировать образцы различного размера, вида, формы;
- анализ является многоэлементным и позволяет получать интересующую информацию в реальном масштабе времени;
- процесс измерения легко поддается автоматизации;
- анализ выполняется в широком диапазоне концентраций: от  $n \cdot 10^{-4}$  до 100 %;
- определение содержания какого-либо элемента практически не зависит от формы нахождения элемента и его химических свойств.

Широкое использование какого-либо метода анализа требует конкретного рассмотрения особенностей его применения в различных условиях и для различных объектов с учетом не только преимуществ, но и ограничений, накладываемых в каждом конкретном случае. Вообще, при выборе того или иного метода анализа и конкретного аналитического комплекса (включая аппаратуру и оборудование, методическое и программное обеспечение, метрологическое сопровождение), необходимо руководствоваться множеством факторов (как объективных, так и субъективных), в числе которых (в порядке уменьшения значимости) можно выделить следующие:

- метод (или комплекс методов) и аппаратно-методические средства их реализации должны решать поставленную задачу;
- поставленная задача должна решаться с наименьшими затратами — материальными, трудовыми, временными и пр.;
- выбранный комплекс должен быть «гибким» и не замыкаться на решении только одной задачи, должна существовать возможность адаптации комплекса к новым условиям, новым объектам.

Важным вопросом при выборе конкретного аппаратного комплекса является его метрологическое обеспечение. С этой точки зрения преимущество получает серийно выпускаемая аппаратура, внесенная в Госреестр средств измерений и допущенная в качестве средства измерений при экологических и сертификационных испытаниях.

Разработана и прошла апробацию оригинальная, не имеющая аналогов, система метрологического обеспечения (МО) радиометрических методов в каротажном, наземном и воздушном вариантах и технология ее использования при поисках, разведке и эксплуатации месторождений, при геологическом картировании и при радиоэкологических исследованиях территорий, загрязненных естественными радионуклидами и радиону-

клидами техногенного происхождения. Система призвана обслуживать следующие радиометрические методы: гамма-каротаж, спектрометрический гамма-каротаж, каротаж методом мгновенных нейтронов деления, гамма-опробование методом разностного эффекта, пешеходная, автомобильная и аэрогамма-съемки в интегральном и спектральном режимах. Основу системы составляет комплекс государственных стандартных образцов состава и свойств естественных и техногенных радионуклидов, имитирующих условия работ в естественном залегании, и аттестованные органами Росстандарта РФ образцовые средства измерений. Система предусматривает передачу размеров единиц от исходных эталонных (образцовых) средств измерений (Государственных стандартных образцов) на стандартные образцы более низкого уровня инструментальным способом (в том числе на рудные интервалы контрольно-поверочных скважин) — с помощью аттестованных органами Госстандарта РФ эталонных (образцовых) средств измерений. Имеется опыт организации МО магнитных, электрических, акустических, сейсмических методов в каротажном варианте.

Уран в настоящее время является одним из важнейших энергоносителей. Основной источник урана для обеспечения растущих потребностей ядерной энергетики — урановые месторождения — природные скопления урановых руд в таких содержаниях, количествах и минеральных формах, при которых их промышленная добыча урана экономически целесообразна.

Методы каротажа на урановых месторождениях в условиях, когда трудно осуществить кондиционный выход керна при бурении скважин, являются практически основными поставщиками измерительной информации о составе и свойствах пород продуктивного горизонта и о параметрах рудных по урану интервалов. К месторождениям, бурение которых с кондиционным выходом керна сопряжено с техническими трудностями и требует больших материальных затрат, относятся в первую очередь месторождения песчаникового типа, предназначенные для отработки подземным скважинным выщелачиванием [4].

Проект метрологического полигона для метрологического обеспечения радиометрических методов каротажа был предложен И.М. Хайковичем, доктором физико-математических наук, профессором, ведущим специалистом и одним из основоположников урановой геофизики и радиоэкогеологии.

Настоящие предложения к проекту содержат требования к конструкции метрологического полигона и размещению в нем исходных образцовых средств измерений (ИОСИ) для метрологического обеспечения радиометрических методов каротажа — гамма-каротажа (ГК), спектрометрического гамма-каротажа (СГК) и каротажа методом мгновенных нейтронов деления (КНД-М). Отличительная особенность этих методов заключается в том, что измерения проводятся в условиях естественного залегания (*in situ*), а эталонная база (ИОСИ) основана на стандартных образцах (СО), адекватно воспроизводящих условия измерений.

В соответствии с ГОСТ 8.315-97 *Стандартный образец — это средство измерений в виде определенного количества вещества или материала, предназначенного для воспроизведения и хранения размеров величин, характеризующих состав или свойство этого вещества (материала), значения которых установлены в результате метрологической аттестации, используемое для передачи размера единицы при поверке, калибровке, градуировке СИ, аттестации методик выполнения измерений и утвержденное в качестве стандартного образца в установленном порядке.*

Для МО перечисленных выше методов каротажа необходимо и достаточно иметь набор из шести стандартных образцов (СО), пересеченных скважиной:

- урановый СО — состава уранового рудного тела (СУРТ). Аттестуемые характеристики: основная — массовая доля урана, дополнительные — массовые доли тория и калия, коэффициент нарушения радиоактивного равновесия между радием и ураном, эффективный атомный номер, коэффициент приведения к нормальной среде, коэффициент влажности и плотность;

- ториевый СО — состава ториевого рудного тела. Аттестуемые характеристики: основная — массовая доля тория, дополнительные — массовые доли урана и калия, эффективный атомный номер, коэффициент приведения к нормальной среде, коэффициент влажности и плотность;

- калиевый СО — состава калиевого рудного тела. Аттестуемые характеристики: основная — массовая доля калия, дополнительные — массовые доли урана и тория, эффективный атомный номер, коэффициент приведения к нормальной среде, коэффициент влажности и плотность;

- смешанный СО — состава уранового, ториевого и калиевого рудного тела. Аттестуемые характеристики: основные — массовые доли калия, урана и тория, дополнительные — эффективный атомный номер, коэффициент приведения к нормальной среде, коэффициент влажности и плотность;

- урановый СО — состава и свойств уранового рудного тела с повышенным влагосодержанием (СОСВУРТ). Аттестуемые характеристики: основные — массовая доля урана, коэффициент влажности и плотность; дополнительные — массовые доли тория и калия, коэффициент нарушения радиоактивного равновесия между радием и ураном, эффективный атомный номер, коэффициент приведения к нормальной среде;

- фоновый СО состава и свойств рудного тела с содержанием урана ниже кларкового значения и с повышенной влажностью. Аттестуемые характеристики: основные — массовая доля урана, коэффициент влажности и плотность; дополнительные — массовые доли тория и калия и радия, эффективный атомный номер, коэффициент приведения к нормальной среде.

Каждый экземпляр СО из перечисленного выше набора представляет собой емкость в виде правильного параллелепипеда (цилиндра) с основанием (диаметром)  $140 \pm 3$  см и высотой  $150 \pm 3$  см, заполненную рудной массой. Первый СО и пятый СО обеспечивают метрологию ГК; метрологическое обеспечение SGK будет обеспечено набором из первых четырех СО или набором, состоящим из первых трех и шестого СО; для МО КНД-М следует воспользоваться набором из двух последних СО, что связано как со спецификой самого метода, так и с тем, что метод КНД-М в основном используется на месторождениях инфильтрационного типа, которые характеризуются повышенной влажностью и нарушенным радиоактивным равновесием между радием и ураном.

#### 1. Общие требования

К набору СО должны быть предъявлены особые требования как в части изготовления и аттестации, так и в части хранения и эксплуатации. В частности, изготовление СО проводится по специальному ТЗ (ТУ), а их аттестация — в соответствии с МИ 3300-2010. Сам полигон для размещения набора СО должен представлять собой специально оборудованное охраняемое, незатопляемое, отапливаемое помещение с соблюдением мер пожарной и радиационной безопасности. СО в помещении полигона должны быть размещены так, чтобы обеспечить круглогодичную эксплуатацию каждого экземпляра в режиме каротажа, а сами СО следует располагать над скважинами из расчета, чтобы обеспечить проведение каротажа не менее чем на 0,5 м за пределы СО.

## 2. Подготовка помещения для строительства полигона

Для строительства полигона следует выбрать участок со стабильной гидрогеологической обстановкой, где уровень грунтовых вод ниже 5 м. Площадь участка должна быть выбрана из расчета, чтобы на нем можно было возвести здание размером 9х8 м<sup>2</sup> и высотой до 3,5 м.

До строительства полигона на выбранной площадке на предполагаемых местах размещения СО следует пробурить на глубину до 10 м шесть скважин и обсадить их заглушенными внизу трубами с внутренним диаметром из расчета, что часть трубы впоследствии будет служить в качестве направляющих муфт при установке СО и что внутренний диаметр отверстия, имитирующего скважину, в каждом СО будет равен 100 мм. Затем вокруг скважин по длине полигона вырыть 2 котлована размером 6,5х2,5 м<sup>2</sup> и глубиной 2 м; дно котлованов засыпать слоем гравия (щебня) 50 см и залить бетоном толщиной 20-25 см, а стенки котлована забетонировать из расчета, чтобы площадь каждого котлована была 6х2 м<sup>2</sup>. После этого обсадные трубы обрезать из расчета, чтобы над дном котлована выступало 20-25 см.

На подготовленные таким образом площадки впоследствии будут установлены все шесть емкостей, которые будут использованы для изготовления СО.

После изготовления СО (заполнения рудным материалом, герметизации и проведения аттестационных измерений) пространство вокруг котлованов следует засыпать гравием (щебнем) и поставить ограждения высотой 0,5-0,6 м.

## 3. Требования к зданию полигона

Здание полигона должно быть построено из расчета, чтобы обеспечить хранение и круглогодичную эксплуатацию СО, для чего температура в помещении должна быть не ниже 0° С, а само помещение снабжено электричеством и оборудовано противопожарной сигнализацией. Для проведения каротажа скважин помещение должно быть оборудовано специальным устройством (тельфером), обеспечивающим перемещение скважинных приборов каротажных радиометров как по вертикали, так и по горизонтали.

Авторами создан Испытательный центр геологической и геофизической продукции (г. Мегион) (рис. 2), основными задачами которого являются:

- разработка и утверждение технических условий, методик испытаний, поверки, градуировки, калибровки, методик выполнения измерений;
- сертификация средств измерений, испытательного оборудования, геологической и геофизической продукции;
- испытания геологической и геофизической продукции с выдачей протоколов испытаний, сертификатов;
- подготовка нормативно-технической документации при проведении испытаний средств измерений с целью утверждения типа, добровольной сертификации средств измерений;
- согласование с ведущими метрологическими институтами России инструкций по геофизической аппаратуре и обработке результатов измерений;
- построение физических моделей горных пород, проведение методических работ на моделях.

В пос. Верхняя Сысерть Свердловской области на базе учебной геофизической практики ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» будет построен полигон для метрологического обеспечения средств измерений, используемых при радиометрических методах каротажа, в частности, в урановых скважинах России и стран СНГ.



Рис. 2. Общий вид полигона моделей

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Ядерно-физическое опробование керна буровых и шлама буровзрывных скважин в условиях открытого рудника / Т.А. Глушкова, Ю.Б. Давыдов, О.Л. Лефтон, А.Г. Талалай // Изв. вузов. Горный журнал. 2015. № 3. – С. 156-163.
- 2) Глушкова Т.А., Савин Е.А., Талалай А.Г. Рентгенофлуоресцентный анализ титано-циркониевого сырья // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 4. С. 97-103. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-4-97-103.
- 3) Глушкова Т. А. Ядерно-физический анализ в системе рационального природопользования: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 1995. – 203 с.
- 4) Хайкович И.М. Каротаж при изучении и освоении месторождений урана: учебное пособие / И.М. Хайкович, В.Г. Языков. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПИ, 2015. – 158 с.



# ОПЫТ КАРТИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ТИПОВ РУД ЗОНЫ ОКИСЛЕНИЯ ЗОЛОТО-УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕВЕРНОЕ (ЭЛЬКОНСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН, РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ))

Гребенкин Н. А. – 1, Карманов Е. Н. – 1, 2, Леденева Н. В. – 1, Мишин И. А. – 1,  
Полбина К. А. – 1, Прозоров В. А. – 1, 2, Чепчугов А. М. – 1, Петрин А. В. – 1  
1 – ФГБУ «ВИМС», 2 – МГРИ, Москва

Изучение Эльконского рудного района (РР) началось в начале 60-х годов прошлого века. Эльконский РР представляет собой группу сближенных месторождений одного геолого-промышленного типа – золото-уранового в приразломных калиевых метасоматитах, в рудах которых сосредоточено более половины балансовых запасов урана РФ. По запасам урана Эльконская группа месторождений занимает 4 место в мире.

В геологическом плане район располагается в центральной части Алданского щита, где приурочен к выступу фундамента – Эльконскому горсту, возникшему в результате дифференцированных блоковых движений. Горст сложен архей-протерозойской дислоцированной гнейсово-сланцевой толщей и ультраметаморфическими гранитоидами, испытавшими в мезозое масштабную тектоно-магматическую активизацию (рис. 1). С ней связано подновление древних глубинных разломов, заложение новых разрывных структур и проявление многофазного щелочноземельного и щелочного магматизма в виде многочисленных малых интрузий. С мезозойской активизацией как пространственно, так и во времени ассоциирует золото-урановое оруденение [2].

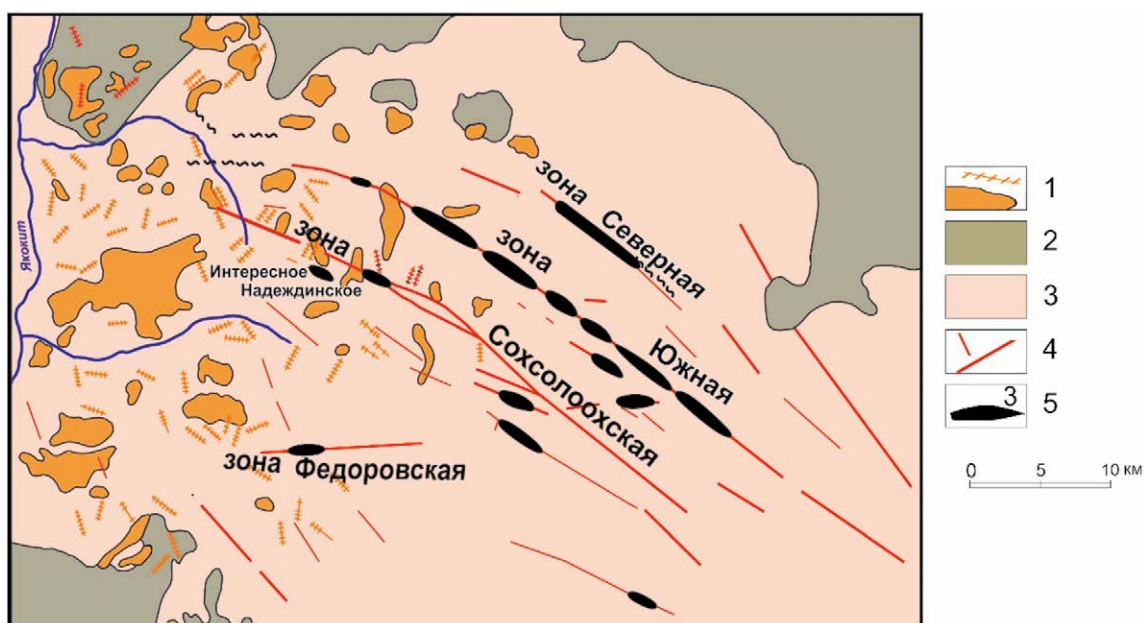


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Эльконского РР

1 – щелочные и субщелочные интрузии (J-K); 2 – платформенные отложения (R-Є1); 3 – гранитно-метаморфические образования фундамента (AR-PR1); 4 – древние тектонические зоны; 5 – золото-урановые месторождения

В минерагеническом отношении Эльконский РР представляет собой серию субпараллельных протяженных зон древнего заложения: Северную, Южную, Сохсолоохскую и Федоровскую, в пределах которых локализованы многочисленные золото-урановые месторождения.

Главным гипогенным минералом урана на всех месторождениях горста является браннерит. Он развивается в зонах брекчирования в виде прожилков мощностью от 0,1 до 1 см и в цементе микробрекчий. Браннериту предшествовало образование пирит-карбонат-калишпатовых околорудных метасоматитов с золотоносным тонко-микрозернистым пиритом. Внутри их ореола сконцентрировано урановое оруденение, которое имеет относительно локальный характер развития [1].

Оруденение на месторождениях горста, в том числе на месторождении Северное, имеет слабопроявленный характер на дневной поверхности. На глубину оно прослежено почти до 2 км, и нижняя граница не оконтурена. Верхняя граница уранового оруденения, сложенного первичными рудами, располагается на глубинах ниже 100-200 м от дневной поверхности. Выше этого уровня по рудным зонам, в силу их высокой трещиноватости, развита кора выветривания, в которых урановые руды значительно окислены, разубожены и до недавнего времени промышленного интереса не представляли. Уран в зоне окисления связан с продуктами изменения гипогенных минералов урана, из которых он частично выносится и переотлагается в виде водных минералов уранила. В то же время золото в зоне окисления переходит в свободную форму в связи с разрушением золотоносного пирита с образованием гидроксидов железа и мельчайших частичек золота [3].

В рамках опытно-методических работ в полевой сезон 2024 г. был задокументирован керн скважин по трем буровым профилям с месторождения Северное. Результаты картирования представлены по профилям 71 и 62, которые пройдены в центральной и юго-восточной частях месторождения соответственно (рис. 2, 3). Картирование включало специализированную геологическую документацию с выделением гидротермально-метасоматических и гипергенных изменений, минеральных ассоциаций и уранового оруденения с применением радиометрического оборудования, ультрафиолетовой лампы и портативного рентгенофлуоресцентного анализатора; фотодокументацию керна; отбор штучных (точечных) и малых минералого-технологических проб; построение геологических колонок и разрезов с выделением на них минеральных ассоциаций, в том числе с указанием интенсивности их развития.

Профиль 71 сложен кристаллосланцами, гранитизированными сланцами, гранито-гнейсами, лейкократовыми гранитами, аляскитами и ортогнейсами (рис. 2а). Мощность тектоно-метасоматической зоны достигает 200 и более метров. В ней проявлены различные по составу мезозойские рудно-метасоматические и современные гипергенные образования (рис. 2б). К первым относятся (от ранних к поздним): предрудные золотоносные пирит-карбонат-калишпатовые и барит-кварцевые метасоматиты; урановая минерализация в виде палевых брекчий (разложенный браннерит); пострудные прожилковые кварц-карбонат-флюоритовые образования. С процессами гипергенеза связано: появление вторичной урановой минерализации, разрушение сульфидов с образованием гидроокислов железа и золота в свободной форме, выщелачивание карбонатов.

Наиболее отчетливо гипергенные процессы картируются по зонам лимонитизации пород (рис. 2в). Окисление имеет преимущественно линейное развитие вдоль основной тектоно-метасоматической зоны. Лимонитизация максимально проявлена в ее централь-

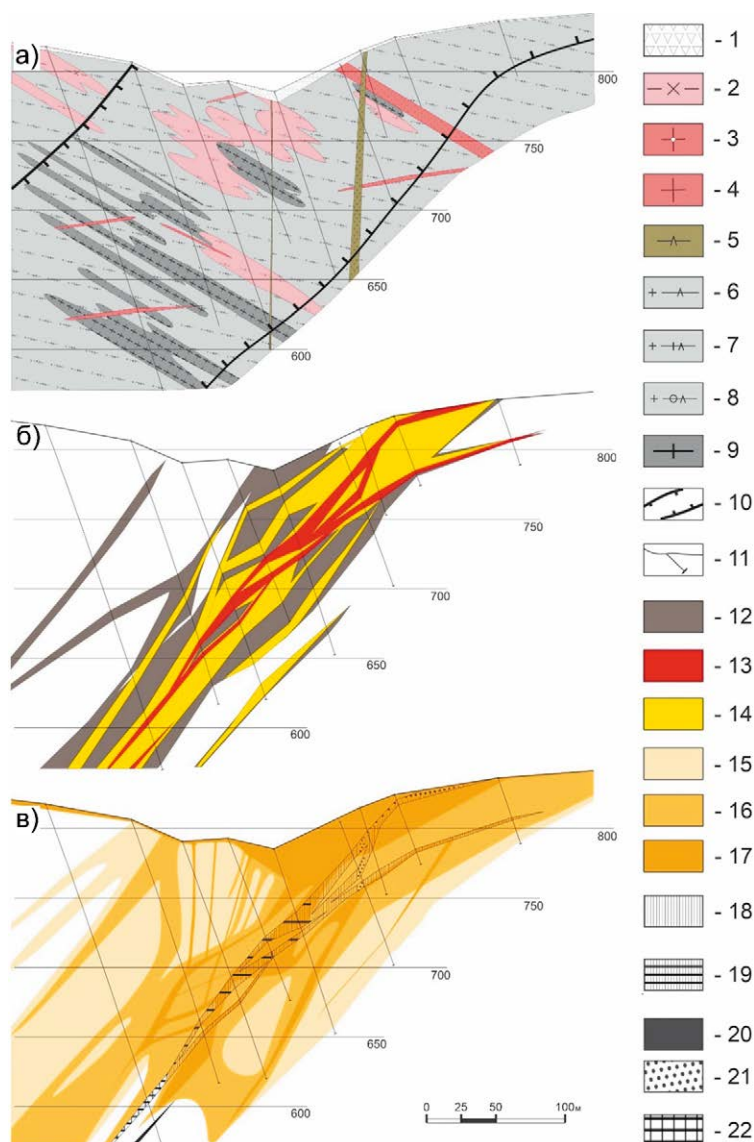


Рис. 2. Геологический разрез по буровому профилю 71, отображающий положение пирит-карбонат-калишпатовых метасоматитов, золотого и уранового оруденений, а также зоны окисления

1 – зона дробления; 2 – гранито-гнейсы; 3 – аляскиты; 4 – лейкограниты; 5 – микродиориты (орто-гнейсы); 6-9 – сланцы различного состава: 6 – амфиболовые, 7 – биотит-амфиболовые, 8 – диопсид-амфиболовые, 9 – неясного состава; 10 – границы тектоно-метасоматической зоны; 11 – скважины; 12 – калишпатовые и пирит-карбонат-калишпатовые метасоматиты; 13-14 – рудные тела: 13 – урановые, 14 – золотые; 15-17 – степень окисления: 15 – низкая, 16 – средняя, 17 – высокая; 18-22 – урановая минерализация: 18 – вторичная, 19-20 – переменное количество реликтов палевых брекчий и вторичных минералов, 19 – с преобладающим количеством вторичных минералов, 20 – с подчиненными количествами вторичных минералов, 21 – сорбционные формы урана, 22 – палевые брекчии

ной части и вблизи дневной поверхности. Интенсивность лимонитизации снижается с глубиной и к периферии основной зоны.

Предрудные пирит-карбонат-калишпатовые изменения слагают ветвящиеся зоны мощностью от 5 до 100 м (рис. 2б). В участках интенсивного окисления (в осевой части линейной зоны окисления и вблизи дневной поверхности) вследствие выщелачивания карбоната и окисления пирита сохраняются только калишпатовые изменения. Рассматри-

ваемые метасоматиты вмещают золотое оруденение (рис. 2б). Мощность золоторудных тел с содержаниями более 0,4 г/т колеблется от первых метров до 50 м. Свободное золото концентрируется в участках интенсивного окисления.

Пострудное кварц-карбонат-флюоритовое прожилкование проявлено весьма широко, в том числе и за пределами зон пирит-карбонат-калишпатовых изменений. В максимально окисленных частях эти образования фиксируются фрагментарно.

Урановорудные тела имеют вертикальную минералогическую зональность. На разрезе от дневной поверхности до глубины 200 м картируются: гидроксиды железа с повышенным содержанием урана, вторичные минералы урана с люминесценцией отенитового типа, вторичные минералы урана совместно с реликтами палевых браннеритовых брекчий (разложенный браннерит), разложенный браннерит с малым количеством вторичных урановых минералов, палевые брекчии.

Профиль 62 расположен к юго-востоку от профиля 71. В геологическом разрезе профиля наблюдаются преимущественно гранитизированные биотит-амфиболовые и диопсид-амфиболовые сланцы, сланцеватость которых ориентирована под углом 60-70° к оси керна. В двух скважинах наблюдается секущее по отношению к сланцеватости пород тело аляскитовых гранитов (рис. 3а).

Рудно-метасоматическая зона имеет мощность от 25 до 60 м (рис. 3б). Гидротермально-метасоматические преобразования в большинстве своем представлены изменениями рудоконтролирующей пирит-карбонат-калишпатовой стадией. Пирит и карбонат менее устойчивы в гипергенных условиях, чем калишпат, поэтому, в зависимости от степени окисления, в рудно-метасоматической зоне всегда отмечается повышенное количество калишпата и в переменных количествах – реликты пирит-карбонатного агрегата, вплоть до полного его замещения гидроокислами железа. Также отмечаются дорудные барит-кварцевые и пострудные флюорит-карбонат-кварцевые образования. Они, как правило, представлены прожилками или друзовыми агрегатами, и изредка слагают цемент брекчий.

Геологический разрез по профилю 62 характеризуется более широкой и интенсивной зоной окисления, чем разрез по профилю 71. В разрезе по профилю 62 зона гипергенных изменений сочетает признаки как площадного, так и линейного характера распространения (рис. 3в). Процессы корообразования способствовали значительной переработке первичных золото-урановых руд. В геологическом разрезе по профилю 62 наблюдается отсутствие четкой пространственной зональности – урановое оруденение выходит за пределы осевых частей дорудных золотоносных пирит-карбонат-калишпатовых метасоматитов. Это связано с переотложением высокоподвижного шестивалентного урана вне рудно-метасоматических зон при окислении первичных руд. Большая часть урановорудной минерализации представлена водными минералами уранила желто-зеленого цвета с «отенитовым» типом свечения в ультрафиолетовом (УФ) спектре. Также были выделены участки, где предположительно сохраняются реликты первичного гипогенного уранового оруденения. При окислении золотоносного пирита происходит высвобождение золота и образование его вторичных тонких выделений.

Анализ результатов специализированного картирования керна скважин по нескольким буровым профилям, пройденным в разных местах месторождения Северное, подтверждает установленные предшественниками закономерности: пирит-карбонат-калишпатовые метасоматиты всегда вмещают золото и контролируют урановое оруденение. Однако отмечаются и принципиальные геологические и минералогические различия участков,

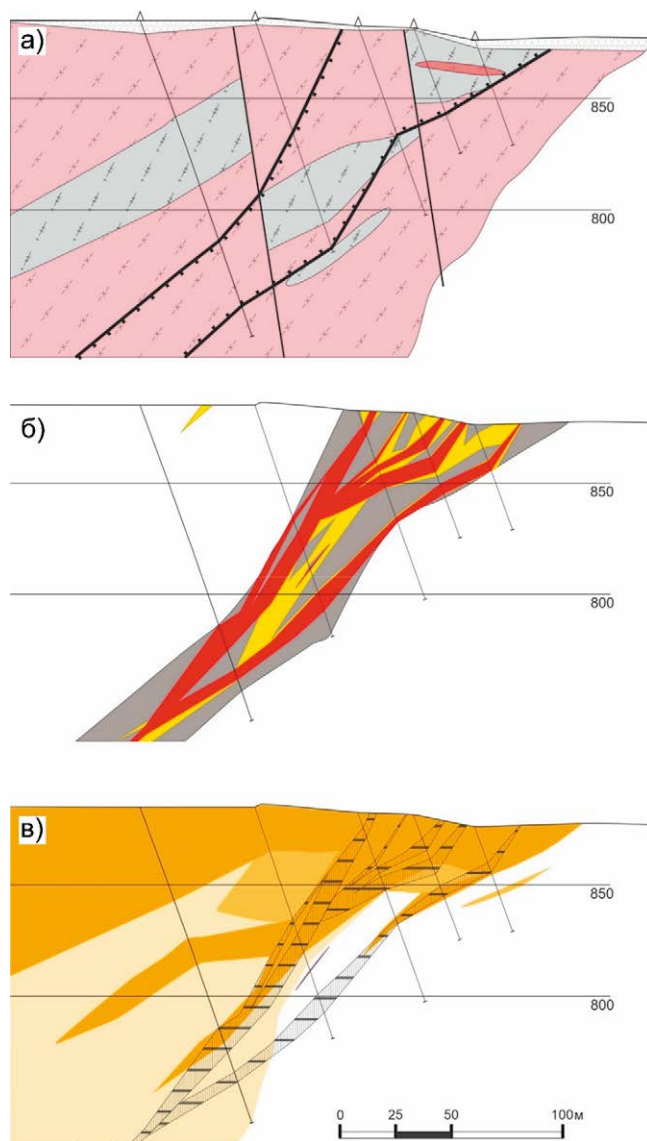


Рис. 3. Геологический разрез по буровому профилю 62, демонстрирующий характер развития пирит-карбонат-калишпатовых метасоматитов, золотого и уранового оруденения, зоны окисления (условные обозначения показаны на рис. 2)

вскрытых бурением. Так, в одном профиле зона окисления имеет линейный характер развития, в другом — площадной. В профиле 71 отмечается вверх по разрезу постепенное преобразование гипогенной урановой минерализации в шестивалентные формы урана. В профиле 62 — урановая минерализация как на глубине, так и вблизи дневной поверхности представлена шестивалентными формами с реликтами палевых брекчий.

Как отмечалось выше, рудовмещающие пирит-карбонат-калишпатовые метасоматиты в зоне окисления интенсивно лимонитизированы, выщелочены и дезинтегрированы, что затрудняет их визуальную диагностику. С целью оперативного выделения и картирования различных природных типов руд в полевых условиях в комплексе с документацией были применены следующие экспресс-методы: промер керн скважин портативным рентгенофлуоресцентным анализатором (РФА), а также изучение рудного керн с помощью ультрафиолетовой лампы на предмет люминесценции вторичной урановой минерализации.

Опытным путем для измерения РФА был установлен следующий шаг измерения: для неизмененных пород – 4 м; для пирит-карбонат-калишпатовых метасоматитов – 0,5 м; для урановорудных интервалов – 0,1 м.

Выделение интервалов с повышенными содержаниями урана производилось по результатам гамма-каротажа и корректировалось после радиометрического «точкования». Далее был проведен промер керна портативным РФА с участками сгущения измерений в рудных интервалах для определения содержаний урана и его элементов-спутников: Ti, Nb, Pb, Mo (рис. 4), а также выявление минералов шестивалентного урана при помощи УФ-лампы. Применение этих методов помогло выделить и скорректировать границы урановорудных интервалов после гамма-каротажа, а также разграничить участки с разнотипной урановой минерализацией.

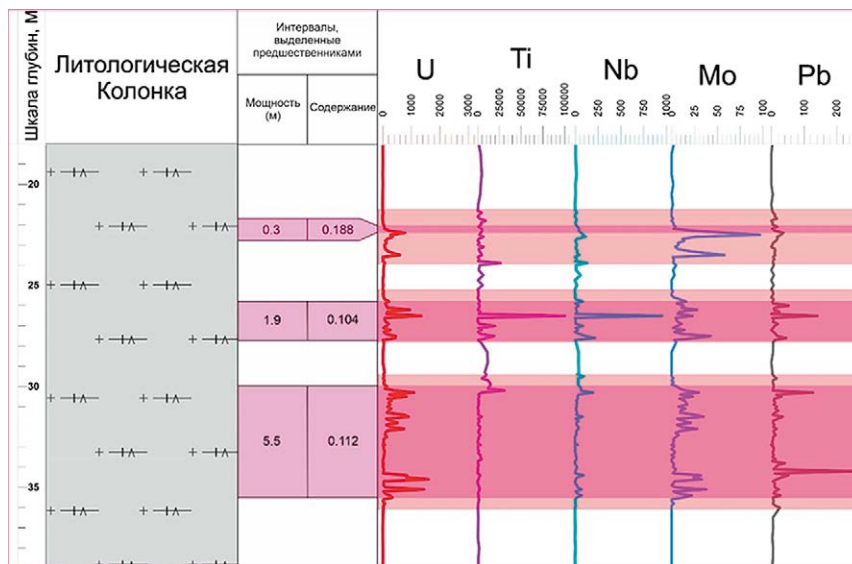


Рис. 4. Фрагмент геологической колонки (скважина С62002) и графики содержания *U, Ti, Nb, Pb, Mo*, (полученные ФГБУ «ВИМС» по результатам измерения РФА), которые совпадают с урановорудными интервалами (выделены АО «ЭГМК» по гамма-каротажу и опробованию – показаны темно-красным цветом)

Интервалы с повышенными содержаниями золота были выделены по результатам опробования, полученным предшественниками. Корректное определение золота в кернах скважин с помощью портативного РФА не представлялось возможным. Однако после проведения измерений было установлено, что золоторудные интервалы характеризуются отчетливыми повышениями содержаний элементов-спутников золота: *Ag, As, Tl, V* (рис. 5).

В процессе документации керна скважин по месторождению Северное было установлено, что геологическое строение, мощность рудоносных структур, закономерности их локализации, и, главное, минеральный состав руд могут значительно отличаться по простиранию и на глубину рудной зоны. Это свидетельствует о необходимости проведения минералого-технологического картирования при оценке месторождения. Применение в полевых условиях рентгенофлуоресцентного и люминесцентного методов позволяет выделять различные природные типы руд, разграничить участки с окисленным, неокисленным и полуокисленным типами руд, что дает возможность оперативно осуществлять отбор проб для минералого-технологических и аналитических исследований.

Интервалы распространения золотого и уранового оруденений в зоне окисления в некоторых случаях пространственно не совпадают, так как гипергенная урановая минерализация иногда переотлагается за пределами золотоносных метасоматитов. На процессы извлечения урана из руд влияет тип минерализации (гипогенная, гипергенная или смешанная), что делает актуальной проблему выделения различных природных типов руд.



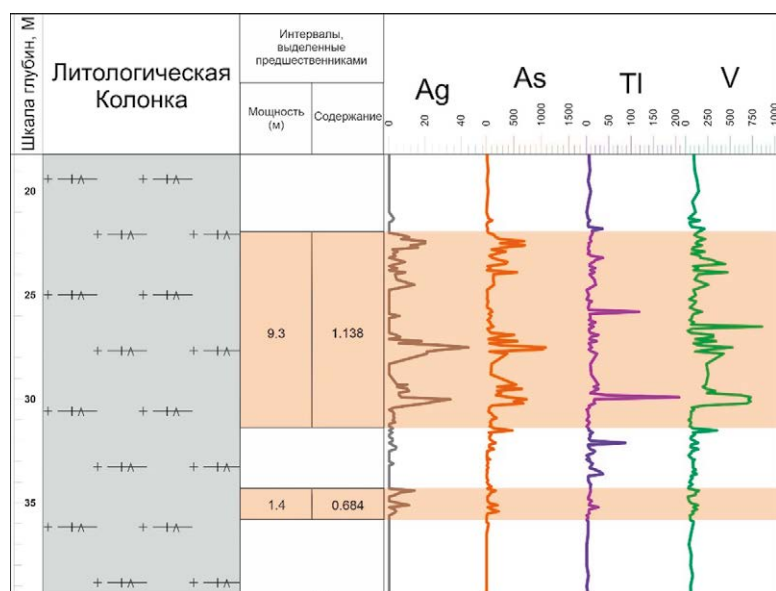


Рис. 5. Фрагмент геологической колонки (скважина С62002) и графики содержания Ag, As, Tl, V (полученные ФГБУ «ВИМС» по результатам измерения РФА), совпадающие с золоторудными интервалами (выделены по результатам опробования АО «ЭГМК» — показаны желтым цветом)

В ближайшей перспективе АО «ЭГМК» планирует приступить к освоению месторождений Зоны Южная. Первоочередным объектом ГРП будет зона окисления, а именно участки со свободным золотом и преимущественно вторичной урановой минерализацией. Также с 2025 г. в рамках федерального проекта «Геология: возрождение легенды» в пределах зоны Сохсолоохская запланировано 3 объекта для проведения ГРП — 2 поисковые площади и 1 оценочная. Основной задачей ГРП по государственному заказу является модернизация и разработка технологии переработки первичных и окисленных золото-урановых руд Эльконского района. Учитывая наличие здесь многочисленных природных типов руд и, очевидно, нескольких технологических, их картирование представляется одной из главных задач будущих ГРП. Изложенные результаты и разработки по специализированному картированию необходимо использовать в рамках планируемых ГРП в Эльконском золото-урановом районе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Мигута А.К. Состав и парагенетические минеральные ассоциации урановых руд Эльконского района (Алданский щит, Россия) // Геология рудных месторождений. — 1997. — Т. 38. — № 4. — С. 323-343.
- 2) Мигута А.К. Урановые месторождения Эльконского рудного района на Алданском щите // Разведка и охрана недр. — 2024. — № 6. — С. 192-212.
- 3) Тарханов А.В., Бугриева Е.П., Колпаков Г.А. 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.

## PETROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE FORMATION OF SUB-ALKALINE PICRITES OF THE KHOJAVEND SUBZONE

*Imamverdiyev N.A. — 1, Saryev F.H. — 2, Babayeva G.J. — 2*

*1 — Baku State University, Baku, 2 — Institute of Geology and Geophysics, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan*

**Key words:** Khojavend subzone, picrite, zoned pyroxene, crystallization differentiation.

**Introduction.** The formation of picrites is related to the melting of the mantle substrate at high degree. Therefore, their geochemical composition corresponds mainly to the composition of the core mantle. Besides these, in most cases, picrites are homogeneous both in the world's oceans and continents. In some cases, they are formed by the direct control of crystallization differentiation. In this sense, the study of the genesis of picrites is of great importance.

According to the existing geological and petrological sources, the study of monoclinic and rhombic pyroxenes, which are part of picrites, is the most realistic source of genetic information in determining the evolutionary processes of their primary fusion, thermobaric conditions of their crystallization, as well as their potential mineralization.

Unlike other rock-forming minerals, pyroxenes are more resistant to derivative processes and can preserve their originality. In this sense, the study of their complex physico-chemical and petrological characteristics can be quite important in the research of the petrological and geological conditions of picrites occurrences of the Khojavend subzone.

**Research methods.** Microprobe, chemical and X-ray diffraction methods were used to determine the reliability of the presented pyroxene analyses. Microprobe analyses of pyroxene phenocrysts were carried out by using an internal standard in electron probe microanalysis (JEOL, JSM-6610 LV, Oxford Instruments, X-MAX). All microprobe, X-ray diffraction and chemical analyses of pyroxenes were carried out at the analytical center of the Institute of Geology and Geophysics of the Azerbaijan National Academy of Sciences. The crystallochemical formulas of the minerals were determined by the Kushiro method [2], and the crystallization temperature was determined by the Lindsley paleothermometer [3].

**Experimental part.** Subalkaline analogs of picrites occur in association with tephrites, trachybasalts, and teshenites of the Khojavend subzone of the Lesser Caucasian Megaanticlinorium [3]. The described subalkaline picrites form a gradual transition with teschenite on the one hand, and tephrite on the other hand.

At the same time, a limited amount of chrome diopside and phlogopite inclusions of 0,5x5 cm size were found in the breccias of tephrite. A thin thermal contact is observed between those inclusions and tephrite. Teschenite is freckled-gray, dark-gray and gray-black colored and varies from top to bottom by gravity of rock types. Volcanites are located in the center of the Khojavend subzone surrounded by Santonian limestones [1, 4].

Macroscopically, the picrites of the Khojavend subzone is dark black, and relatively greenish-black pyroxene grains, sometimes colorless and pale brown phlogopite grains are easily visible to the naked eye against their background (fig. 1,2).

Picrites of the Khojavend subzone is located in the contact zones of picrites and basalts from the petrochemical point of view. The abundance of alkaline ( $Na_2O+K_2O$ ), chrome and titanium oxides than the previous petrographic types of rocks shows some peculiarities of the primary fusion of these picrites. Besides these, the amount of magnesium oxide gradually

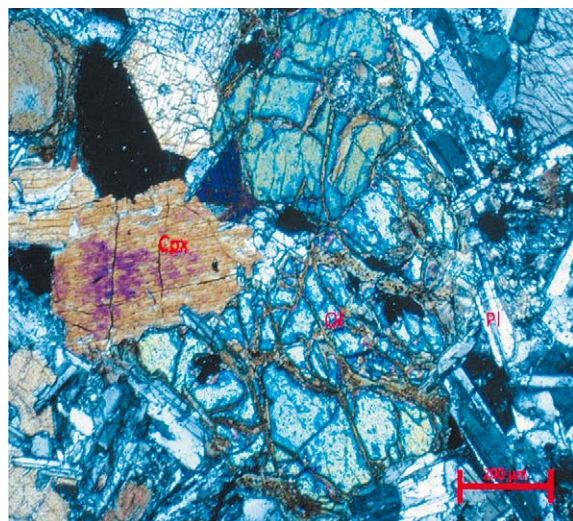


Fig. 1

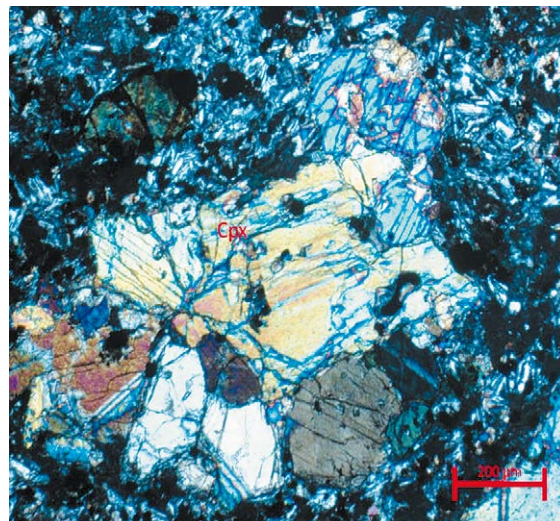


Fig. 2

decreases from 22.4% to 11.78%, starting from the subalkaline melanocrate type towards the leucocrate type due to other petrochemical characteristics of subalkaline picrites. Such an alteration is also occurred in the normative mineralogical composition of picrites. So, the normative forsterite molecule decreases from olivine subalkaline picrites to leucocratic picrites. The subalkaline picrites of the Khojavand subzone are nepheline normative.

**Results and their discussion.** Clinopyroxene megacrysts in Khojavend flexure contain chrome diopside with partial low-grade titanium oxide as phenocrysts in subalkaline picrites. In this sense, the central part of zoned phenocrysts is almost similar with megacrysts in terms of composition. The absence of discreteness and gradual transitions between the zones, as well as the decrease of chromium, magnesium oxides and the increase of aluminum and titanium oxides from the center to the outside can be considered a sign of the regulation of the evolution process of subalkaline picrite magma by crystallization differentiation.

#### REFERENCES

- 1) Babayeva G.J. Petrological-mineralogical evolutionary transformation of Cretaceous teschenite-tephrite, syenite-trachyte, and essexite-trachybasalt primary meltings (Carpathian, Caucasian and North TransBaikal regions) // Journal of Geology, Geography and Geoecology. – V. 32 (3). – P. 450-460 (2023). doi:10.15421/112340
- 2) Kushiro I. Clinopyroxene solid solutions. Part I. The  $CaAl_2SiO_2$  component. Jap. J. Geol. Geogr. – No. 33. – 1965. – P.p. 213-220.
- 3) Lindsley Donald H. Pyroxene thermometry.// American Mineralogist. – Vol. 68 (5-6). – 1983. – P.p. 477-493.
- 4) Mammadov M.N., Babayeva G.J., Sariyev F.H. Petrogenetic role of pyroxenes in the formation of picrites of the Lesser Caucasus and Talysh zone. ANAS Transactions, Earth Sciences 2/2024. – P.p. 3-16. doi: 10.33677/ggianas20240200122.

## ХРОМИТОЛИТЫ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ВЕП – ГЕНЕЗИС, ИСТОЧНИКИ, СЫРЬЕВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Лаломов А.В., Григорьева А.В., Иванова Л.А.  
ФГБУН «ИГЕМ РАН», Москва

Хром относится к стратегическим металлам, но при этом примерно половина потребностей России в хромовом сырье обеспечивается за счет зарубежных закупок. Государственным балансом запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 01.01.2022 г. было учтено 51,4 млн т хромовых руд категорий А+В+С<sub>1</sub>+С<sub>2</sub>, преимущественно в магматогенных месторождениях. Запасы Сарановской группы валунчатых россыпей составляли 151 тыс. т, или 0,3% российских при среднем содержании  $Cr_2O_3$  39,2% [1]. В Итмановской хромит-ильменит-цирконовой россыпи (Лукояновский россыпной район, Нижегородская обл.) в соответствии с кондициями запасы ильменита, лейкоксена и хромита и содержащихся в них оксидов ( $TiO_2$  и  $Cr_2O_3$ ) отнесены к забалансовым по технологическим свойствам. Забалансовые запасы хромита в балансовых (по циркону и рутилу) запасах рудных песков составляют 663,05 тыс. т, или 296,8 тыс. т  $Cr_2O_3$ . В пределах всего Лукояновского россыпного района прогнозные ресурсы категории Р<sub>1</sub> оцениваются в 573 тыс. т  $Cr_2O_3$  [2].

Добыча хромовых руд из недр в 2021 г. составила 523 тыс. т, что покрыло потребности страны на 54 %, при этом импорт хромовых концентратов достиг 442 тыс. т, в основном из Казахстана. Прирост запасов за счет разведки составил 340 тыс. т [1]. Учитывая дефицит хромовых руд в России и то, что геологоразведочные работы восполняют добычу этого сырья только на 60 %, открытие новых, в том числе и нетрадиционных месторождений хромовых руд, может представлять интерес для промышленности.

Таким типом месторождений могут служить хромсодержащие пески, встречающиеся в пределах платформенных областей в окраинных частях складчатых сооружений – как составной части комплексных прибрежно-морских и аллювиальных россыпей тяжелых минералов дальнего сноса, так и собственно хромитовых россыпей ближнего сноса, непосредственно связанных с первичными источниками.

Одним из объектов, требующих дополнительного изучения для оценки перспективности, представляется Сабантуйское россыпное проявление хромшпинелидов, которое было выявлено в разрезе белебеевской свиты казанских отложений пермской системы на юго-западе Башкирии (Федоровский район) [3] (рис. 1).

Рельеф района пологохолмистый, с врезанными долинами мелких и средних водотоков и уплощенными вершинами возвышенностей. Отложения казанского яруса доступны для наблюдения и опробования в отдельных бортах долин, оврагов и искусственных обнажениях (карьерах). В ходе проведенных полевых работ в окрестностях с. Федоровка было выявлено и опробовано 7 обнажений с проявлениями россыпной хромитонности (рис. 2). Точки опробования 2–5 находятся в пределах наиболее богатого россыпепроявления Сабантуй [4].

Россыпепвещающие отложения представлены толщей разнотернистых песчаников с прослоями окремнелых известняков и гравийно-галечных отложений казанского яруса пермской системы. Выделяются две литолого-фациальные разновидности осадочных комплексов с повышенными содержаниями хромшпинелидов.



1. Средне- и крупнозернистые пески с прослоями и горизонтами гравийных галечников имеют преимущественно косослоистые, перекрестнослоистые текстуры с углами наклона слоев до 15-25°. Крупнообломочный материал в основном плохо- и среднеокатанный, по составу представлен кремнями и кварцитами. Мощность косослоистых серий достигает 1,5 м. Такие отложения составляют основную часть разрезов 1, 6 и 7 (рис. 3) и относятся к аллювиальному типу. Хромотоносность отложений слабая – в косослоистых и субгоризонтально слоистых песчаных отложениях наблюдаются отдельные тонкие (до 2-3 мм) прослои темноцветных минералов.

2. Разнозернистые и алевритистые пески имеют горизонтальную, пологонаклонную и волнистую слоистость, хромотоносные горизонты перекрываются карбонатными прослоями. Присутствуют редкие прослои гравия и мелкой гальки. Фациально этот комплекс

Рис. 1. Схематическое строение южноуральской складчатой зоны и восточной части ВЕП.

- 1 – палеозойские складчатые структуры Южного Урала,
- 2 – Башкирский мегаантиклинорий (рифей),
- 3 – Главный Уральский разлом,
- 4 – гипербазитовый массив Крака,
- 5 – отложения чехла ВЕП (преимущественно пермской системы),
- 6 – Федоровский россыпной узел

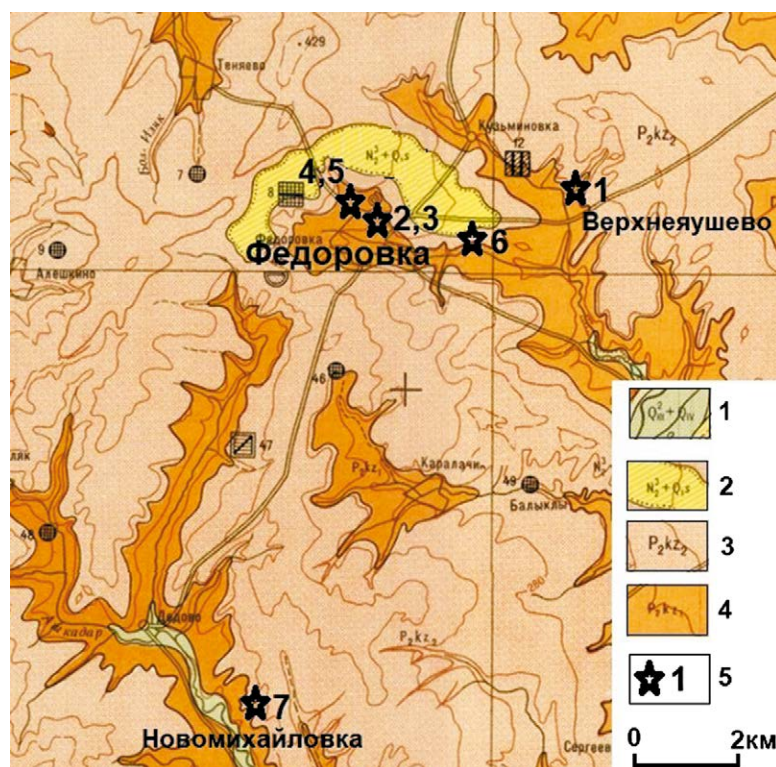
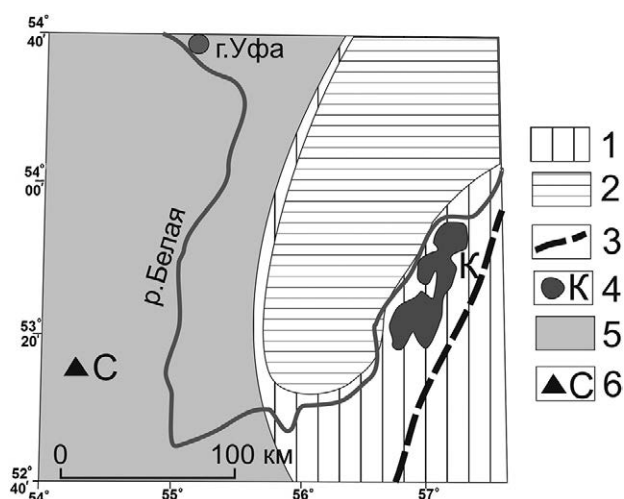


Рис. 2. Схема опробования Федоровского россыпного узла на геологической карте масштаба 1:200 000 N-40-XXVI (1965 г.) [5]

- 1 – верхнечетвертичные отложения объединенные;
- 2 – верхний плиоцен и нижнечетвертичные отложения, общесыртовая свита;
- 3, 4 – пермская система, казанский ярус: 3 – верхний подъярус, 4 – нижний подъярус;
- 5 – россыпепроявления: 1 – Верхнеяшево, 2-5 – Сабантуйское россыпепроявление: 2, 3 – М. Беркутла (обнажение в русле и в шурфе на лев. берегу, северная окраина пос. Федоровка); 4, 5 – Садовый пруд (юго-восточная и северная части побережья водоема);
- 6 – Колхозный пруд;
- 7 – Новомихайловское

можно отнести к отложениям литорали и прибрежного мелководья морских или озерных водоемов. Слоистость подчеркивается повышенными содержаниями темноцветных минералов (рис. 4). Цемент песчаников карбонатный пелитоморфный, содержание цемента 20–35 %. С этим комплексом связана основная хромовая минерализация узла. Мощность горизонта с повышенными содержаниями хромшпинелидов достигает 1,3 м.

Анализируемые пробы отбирались из прослоев с повышенными содержаниями хромшпинелидов. Их валовый химический состав анализировался РФА (табл. 1), минеральный состав был исследован в протолочках (табл. 2, 3) и шлифах. Внутренняя структура и химический состав зерен хромшпинелидов изучались в полированных шашках и шлифах на сканирующем электронном микроскопе (рис. 5) и с применением микрозондового анализатора (табл. 4).

Среди зерен хромитов преобладают неокатанные и плохоокатанные (60 %), идиоморфные слабоокатанные (25–30 %). Окатанные и частично окатанные (раздробленные) составляют 10–15 %.

Полученные данные позволяют дать оценку генезиса, источников и сырьевых перспектив россыпепроявлений хромитоносных песчаников Федоровского узла.

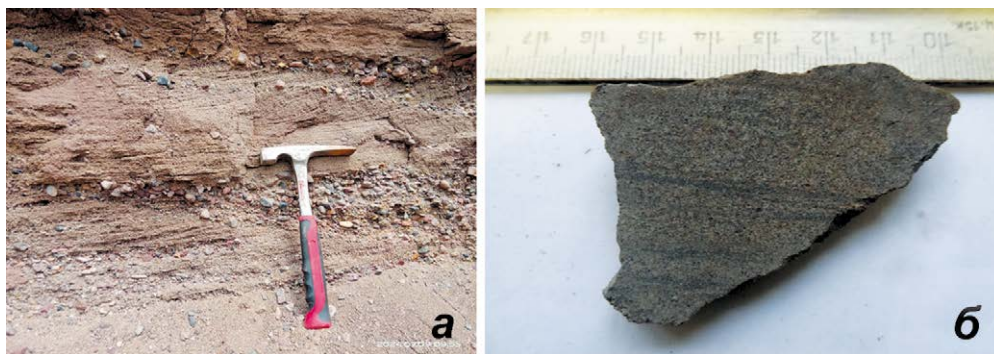


Рис. 3. Аллювиальные отложения Федоровского россыпного узла (проба 6, проявление «Колхозный пруд»): а – общая структура отложений; б – структура прослоев темноцветных минералов в горизонтах песчаника

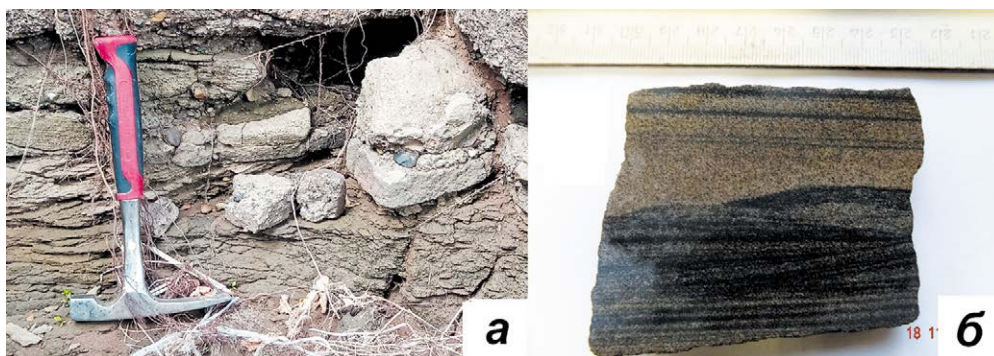


Рис. 4. Литоральные и прибрежно-мелководные отложения Сабантуйского россыпепроявления: а – горизонт хромосодержащих песчаников в русле руч. М. Беркутла (точка 2 на рис. 2); б – пологоволнистые, перекрестнослоистые и градационные структуры прослоев темноцветных минералов песков (точка 5 на рис. 2)



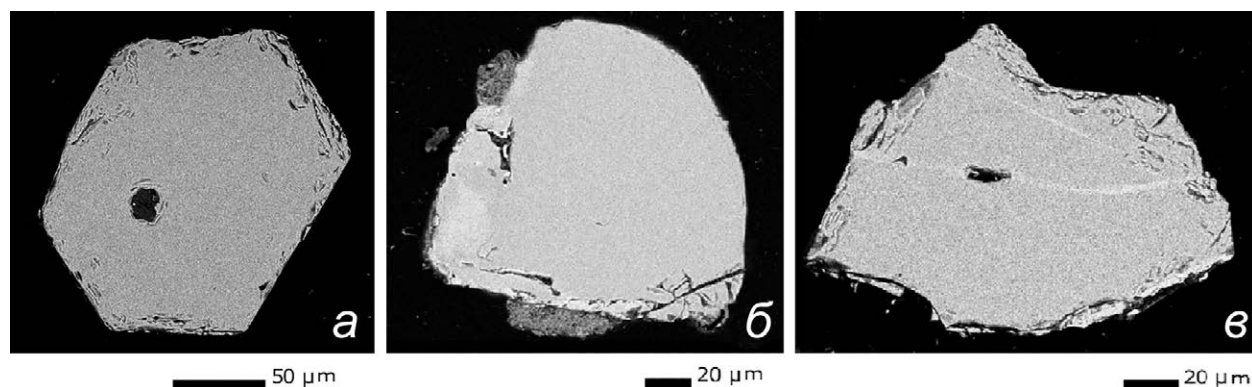


Рис. 5. Морфология зерен хромшпинелидов (BSE): а – идиоморфные; б – окатанные и частично окатанные (расколовшиеся окатанные зерна); в – осколочные неокатанные

Таблица 1. Химический состав проб Федоровского узла по данным РФА

| №№ проб                      | CaO<br>% | TiO <sub>2</sub><br>% | MnO<br>% | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ.<br>% | Cr<br>ppm | Zn<br>ppm | Rb<br>ppm | Sr<br>ppm | Zr<br>ppm | Ba<br>ppm |
|------------------------------|----------|-----------------------|----------|------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| «аллювиальные»               |          |                       |          |                                          |           |           |           |           |           |           |
| 1                            | 6,83     | 1,36                  | 0,15     | 12,26                                    | 20683     | 165       | 24        | 99        | 1299      | 163       |
| 6                            | 17,78    | 0,98                  | 0,40     | 7,14                                     | 6743      | 87        | 20        | 126       | 119       | 163       |
| 7                            | 14,32    | 2,05                  | 0,35     | 12,94                                    | 15613     | 154       | 21        | 125       | 407       | 174       |
| «мелководные озерно-морские» |          |                       |          |                                          |           |           |           |           |           |           |
| 2                            | 24,69    | 2,48                  | 0,21     | 11,04                                    | 33281     | 218       | 13        | 166       | 173       | 60        |
| 3                            | 24,20    | 3,42                  | 0,23     | 14,94                                    | 45025     | 284       | 12        | 154       | 247       | 69        |
| 4                            | 22,96    | 4,79                  | 0,24     | 21,25                                    | 68265     | 352       | <10       | 181       | 426       | 34        |
| 5                            | 22,96    | 2,76                  | 0,28     | 13,55                                    | 42801     | 255       | 13        | 252       | 255       | 60        |

Таблица 2. Минеральный состав проб Федоровского узла (валовый состав на исходную пробу) по данным оптических исследований в протолочке

| №№ проб →            | 2                            | 3     | 4     | 5     | Среднее | 1              | 6    | 7    | Среднее |
|----------------------|------------------------------|-------|-------|-------|---------|----------------|------|------|---------|
| Фациальная зона      | «мелководные озерно-морские» |       |       |       |         | «аллювиальные» |      |      |         |
| Тяжелая фракция (тф) |                              |       |       |       |         |                |      |      |         |
| Mt+TiMt              | 36,66                        | 28,50 | 32,11 | 21,16 | 29,61   | 6,25           | 0,90 | 2,98 | 3,38    |
| Хромшпинелиды        | 16,53                        | 13,00 | 14,85 | 10,57 | 13,74   | 3,73           | 0,15 | 0,89 | 1,59    |
| Ильменит             | 1,96                         | 1,50  | 3,62  | 0,86  | 1,98    | 0,91           | 0,08 | 0,55 | 0,51    |
| Гематит              | зн                           | зн    | зн    | зн    |         | зн             | зн   | 0,30 |         |
| Циркон               | зн                           |       | зн    | зн    |         | 0,50           | зн   | 0,12 | 0,21    |

| №№ проб →              | 2                                   | 3     | 4     | 5     | Среднее | 1                     | 6     | 7     | Среднее |
|------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|---------|-----------------------|-------|-------|---------|
| <b>Фациальная зона</b> | <b>«мелководные озерно-морские»</b> |       |       |       |         | <b>«аллювиальные»</b> |       |       |         |
| Рутил                  | зн                                  |       |       |       |         | 0,20                  |       |       |         |
| Турмалин               | зн                                  |       |       |       |         | 0,10                  |       |       |         |
| Эпидот                 |                                     | 0,50  | зн    | зн    | 0,13    | 0,00                  | 0,01  | 0,18  | 0,06    |
| Гранаты                | 0,65                                | 1,50  | 0,72  | 0,43  | 0,83    | 0,10                  | 0,00  |       | 0,03    |
| Амфиболы               | 0,65                                | 0,50  | 0,72  | 0,86  | 0,68    | 0,10                  | 0,10  | 0,48  | 0,23    |
| Г/ок железа            | зн                                  | зн    | зн    | зн    |         | зн                    | 8,65  | 14,70 | 7,79    |
| Всего тф               | 56,46                               | 45,50 | 52,02 | 33,88 | 46,84   | 11,90                 | 9,90  | 20,20 | 13,92   |
| <b>Легкая фракция</b>  |                                     |       |       |       |         |                       |       |       |         |
| Кварц                  | 2,18                                | 6,00  | 2,77  | 4,57  | 3,88    | 65,63                 | 6,93  | 37,64 | 36,73   |
| Полевые шпаты          | 0,87                                | 1,00  | 0,28  | 0,57  | 0,68    | 1,80                  | 15,84 | 14,11 | 10,58   |
| Карбонаты              | 32,51                               | 39,00 | 18,53 | 39,40 | 32,36   | 4,50                  | 52,49 | 6,76  | 21,25   |
| Кремнистые обл.        |                                     |       |       |       |         | 11,69                 | 0,00  | 6,59  | 6,09    |
| Фосфаты                | зн                                  | 1,00  | 0,83  | 1,14  | 0,74    | 2,70                  | 0,00  | зн    | 0,90    |
| Хлорит                 | зн                                  | зн    | 1,00  | зн    |         | 1,80                  | 2,97  | зн    | 1,59    |
| Гидрослюда             |                                     |       | 0,28  | 1,14  | 0,71    |                       | 11,88 | 2,82  | 7,35    |
| Обломки песчан.        | 7,99                                | 7,50  | 24,30 | 19,29 | 14,77   |                       | зн    | зн    | 3,96    |

*Примечание.* Mt+TiMt – магнетит + титаномагнетит; «зн» – знаки (содержания менее 0,1 %). Пустые ячейки – минерал не обнаружен.

Таблица 3. Минеральный состав тяжелой фракции (без гидроокислов железа) проб Федоровского узла по данным оптических исследований в протолочке

| №№ проб →     | 2     | 3     | 4     | 5     | Среднее | 1     | 6     | 7     | Среднее |
|---------------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|---------|
| Mt+TiMt       | 64,93 | 62,64 | 61,72 | 62,47 | 62,94   | 52,54 | 72,30 | 54,28 | 59,71   |
| Хромшпинелиды | 29,28 | 28,57 | 28,55 | 31,19 | 29,40   | 31,35 | 12,13 | 16,22 | 19,90   |
| Ильменит      | 3,47  | 3,30  | 6,95  | 2,53  | 4,06    | 7,63  | 6,56  | 10,01 | 8,07    |
| Гематит       | зн    | зн    | зн    | зн    |         | зн    | зн    | 5,38  | 1,80    |
| Циркон        | зн    |       | зн    | зн    |         | 4,24  | зн    | 2,15  | 2,13    |
| Рутил         | зн    |       |       |       |         | 1,70  | зн    |       | 0,57    |
| Турмалин      | зн    |       |       |       |         | 0,85  | зн    |       | 0,29    |
| Эпидот        |       | 1,10  | зн    | зн    | 0,37    |       | зн    | 3,23  | 1,08    |
| Гранаты       | 1,16  | 3,30  | 1,39  | 1,27  | 1,78    | 0,85  |       |       | 0,28    |
| Амфиболы      | 1,16  | 1,10  | 1,39  | 2,53  | 1,55    | 0,84  | 8,19  | 8,74  | 5,92    |

*Примечание.* Mt+TiMt – магнетит + титаномагнетит; «зн» – знаки (содержания менее 0,1 %). Пустые ячейки – минерал не обнаружен.

Таблица 4. Состав хромшпинелидов Федоровского узла по данным микрозондового исследования

|                              | $SiO_2$ | $MgO$ | $FeO$ | $TiO_2$ | $Cr_2O_3$ | $Al_2O_3$ | $MnO$ | $NiO$ | $V_2O_5$ | Кол-во проб |
|------------------------------|---------|-------|-------|---------|-----------|-----------|-------|-------|----------|-------------|
| «аллювиальные»               |         |       |       |         |           |           |       |       |          |             |
| Среднее                      | 0,01    | 10,84 | 20,75 | 0,15    | 49,10     | 17,33     | 0,32  | 0,08  | 0,16     | 80          |
| Станд. откл.                 | 0,01    | 2,22  | 5,03  | 0,15    | 8,48      | 7,80      | 0,08  | 0,05  | 0,07     |             |
| «мелководные озерно-морские» |         |       |       |         |           |           |       |       |          |             |
| Среднее                      | 0,01    | 10,85 | 20,34 | 0,16    | 49,02     | 17,55     | 0,32  | 0,07  | 0,17     | 128         |
| Станд. откл.                 | 0,02    | 2,21  | 4,56  | 0,17    | 7,74      | 7,41      | 0,08  | 0,03  | 0,07     |             |

Исследование литологии отложений позволяет выделить два фациальных типа: песчано-гравийно-галечный и транзитный аллювиальный, образованный, скорее всего, серией небольших гидродинамически активных водотоков. Судя по мощности косослоистых серий и крупности материала (вплоть до мелких валунов), скорости водных потоков могли достигать 2-3 м/с [6]. Рельеф этого времени представляется гораздо более расчлененным, чем современный; зона россыпеобразования предположительно находилась на периферии горного сооружения и характеризовалась умеренно-высокой гидродинамикой среды. В пределах аллювиального предгорья отмечались локальные озерные или прибрежно-морские обстановки седиментации, где в условиях литорали и мелководья обогащались и накапливались хромитонесущие отложения.

Минеральный состав аллювиальных и прибрежно-морских (-озерных?) отложений близок между собой. В то же время отмечается относительно повышенное содержание циркона в отложениях аллювиальной серии (см. табл. 1, 2 и 3), что ставит вопрос о необходимости более детального изучения связи этих фациальных типов между собой: как правило, в бассейнах осадконакопления циркон накапливается по сравнению с транзитными обстановками. Данный вопрос требует дополнительного и более детального изучения. Не исключено, что часть исследованных разрезов относится к разным возрастным подразделениям пермской системы: в первую очередь имеется ввиду разрез 7 (Новомихайловское). В то же время хромшпинелиды обеих зон по составу практически идентичны (табл. 4), что свидетельствует об их общем источнике в отложениях Федоровского узла.

Анализ генезиса хромшпинелидов с использованием классификационной диаграммы  $Cr-Al-Fe^{3+}$  (рис. 6) с целью установления формационной принадлежности их источников показал, что хромшпинелиды Федоровского россыпного узла в большинстве своем соответствуют офиолитовой ассоциации. На представленной диаграмме они практически полностью попадают в поле офиолитов и образуют непрерывное протяженное поле, отвечающее мантийному тренду дифференциации.

На уровне современного эрозионного среза ближайшие офиолитовые массивы (Крака) расположены в 180 км к востоку от Федоровского узла. Представляется проблематичным, что хромшпинелиды переносились на такое расстояние без разубоживания и заметного окатывания. По крайней мере хромшпинелиды россыпи, расположенной в дельте р. Гад на западном побережье Индии, имеют заметную окатанность («rounded to sub-rounded») на расстоянии переноса в 30-40 км [8].

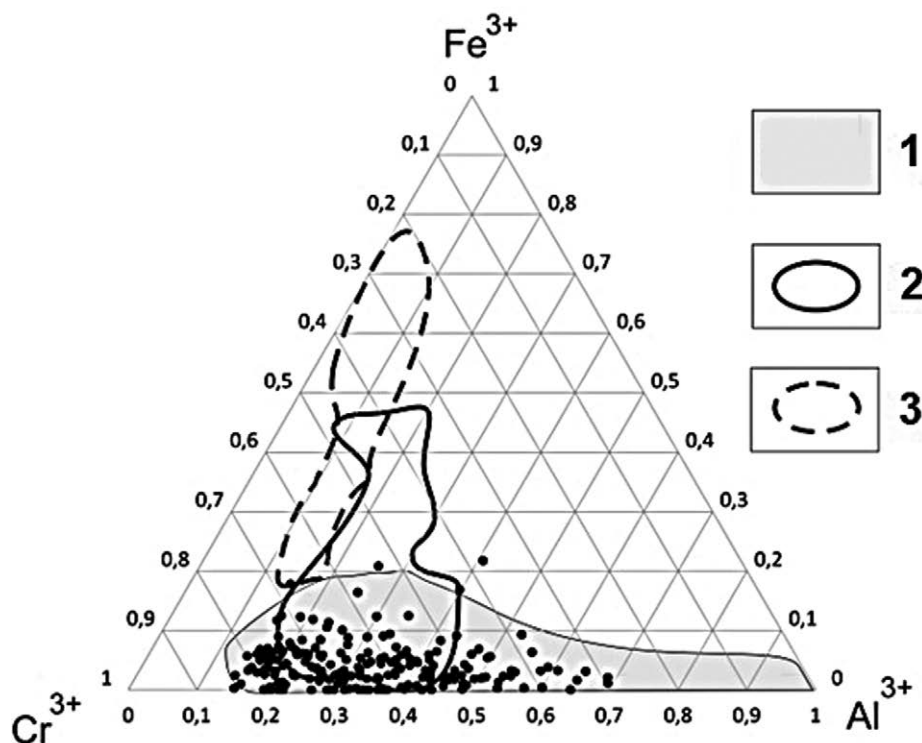


Рис. 6. Классификационная диаграмма  $Cr-Al-Fe^{3+}$  для хромшпинелидов Федоровского россыпного узла (208 анализов). Поля составов хромшпинелидов (50%-ный контур) из: 1 — офиолитов, 2 — расслоенных интрузивных массивов (*layered intrusions*), 3 — концентрически-зональных платиноносных массивов (*Alaskan zoned ultramafic complexes*). Поля составов хромшпинелидов из ультрамафитов различной формационной принадлежности даны по [7]

Россыпи Федоровского узла несут признаки ближнего сноса. Возможное объяснение феномену существования таких россыпей может быть дано исходя из шарьяжной модели формирования гипербазитовых массивов [9, 10]. Можно предположить возможность продвижения офиолитового аллохтона далеко на запад от зоны офиолитовых швов в сторону Восточно-Европейской платформы (во время пермского орогенеза), ближе к тем морфоструктурным и литодинамическим обстановкам, которые были благоприятны для накопления хромитовых россыпей типа Сабантуйской [3, 11].

Что касается промышленного потенциала Сабантуйского россыпепроявления, проведенные исследования позволяют оценить параметры россыпного тела хромитовых песчаников по 3 пересечениям пласта в 2 обнажениях и 1 шурфе. Мощность пласта изменяется от 0,9 до 1,3 м (средняя 0,95 м), видимая протяженность рудного тела 350 м при предполагаемой ширине 50 м, то есть минимальный объем руды можно оценить в 16,7 тыс. м<sup>3</sup>. При плотности руды 3-3,5 г/см<sup>3</sup> (средняя 3,2 г/см<sup>3</sup>) ресурсы хромитовой руды оцениваются примерно в 53,2 тыс. т [4]. Содержание  $Cr_2O_3$  по данным анализа точечных проб хромитовых песчаников (4 образца) по данным РФА составляет 7,1 %, по данным минералогического анализа и микрозонда — 6,9 %. Таким образом, видимые ресурсы  $Cr_2O_3$  составляют 3,7 тыс. т, но нужно учитывать, что россыпепроявление не околонушено по простиранию и рассчитанные геометрические параметры тела по площади являются минимальными. Для более реальной оценки необходима постановка буровых работ, преимущественно на северном фланге проявления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году». М.: ВИМС-ЦНИГРИ, 2022. — 622 с.
- 2) Разработка технико-экономического обоснования постоянных кондиций, подсчет запасов титано-циркониевых песков Итмановской россыпи Лукояновского м-ния в Нижегородской области (по состоянию на 01.06.2010). Отчет / ФГУП «ВИМС», 2010. Отв. исп. Быховский Л.З.
- 3) Рахимов И.Р., Савельев Д.Е., Холоднов В.В., Замятин Д.А. Уникальная Сабантуйская хромитовая палеороссыпь в осадочном чехле Восточно-Европейской платформы // Геология рудных месторождений. 2020. — № 6. — С. 568-573. <https://doi.org/10.31857/S0016777020050068>.
- 4) Рахимов И.Р. Федоровские разрезы казанского яруса в Южном Предуралье: геологическая и литологическая характеристика отложений // Геология. Известия отделения наук о Земле и природных ресурсов АН РБ. 2021. — № 8. — 60-68.
- 5) Геологическая карта СССР. N-40-XXVI. Масштаб: 1:200 000, Южно-Уральская серия / Башкирское территориальное геологическое управление, 1965 г. Ред. Яковлев Г.Б.
- 6) Julien, P.Y. *Erosion and Sedimentation*. 1995. Cambridge University Press. — 280 p.
- 7) Barnes S., Roeder P. *The Range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks*. *Journal of Petrology*, 2001. 42, pp. 2279–2302. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.12.2279>.
- 8) Gujar A.R., Ambre N.V., Iyer S.D., Mislankar P.G. and Loveson V.J. *Placer chromite along south Maharashtra, central west coast of India*. *Current Science*. — 2010. — 99(4). — Pp. 492-499.
- 9) Казанцева Т.Т., Камалетдинов М.А., Гафаров Р.А. Об аллохтонном залегании гипербазитовых массивов Крака на Южном Урале // Геотектоника, 1971. — № 1. — С. 96-102.
- 10) Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2. 2010. — 80 с.
- 11) Лаломов А.В., Рахимов И.Р., Григорьева А.В. Хромитовые россыпные проявления Волго-Уральского бассейна — вопросы генезиса, источников и промышленного потенциала // Георесурсы, 2021. — № 3. — С. 70-75. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.03.17>.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ УРАНОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ ПАЛЕОДОЛИННОГО ТИПА НА ФЛАНГАХ ДЕЙСТВУЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА ЗАУРАЛЬЯ

Лопин С. О., Прохоров Д.А., Сащенко А.В., Масло М.Ю., Ржевская А.К., Гулынин А.В., Овсянникова Т.М., Несмеянова А.И. – 1; Ладейщиков А.В. – 2

1 – ФГБУ «ВИМС», Москва,

2 – АО «Далур», Курганская обл., Далматовский р-н, с. Уксянское

Анализ МСБ урана России показывает, что в настоящее время наиболее экономически привлекательными для отработки являются месторождения урана песчаникового типа, в том числе отечественные объекты в эрозионных палеодолинах, которые пригодны для освоения наиболее дешевым методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ). Одно из предприятий, ведущих добычу методом СПВ на территории России – АО «Далур», осваивающее в Зауральском УРР Добровольное, Хохловское и Далматовское месторождения. По состоянию на 01.01.2024 г. оно обеспечено балансовыми запасами в количестве 11,1 тыс. т урана. С учетом ежегодной добычи, которая составляет около 600 т урана, к 2040 г. АО «Далур» выработает запасы месторождений (рис. 1). В этой связи начата активная деятельность по постановке прогнозных и поисковых работ, что, в свою очередь, требует обновления и совершенствования прогнозно-поискового комплекса.

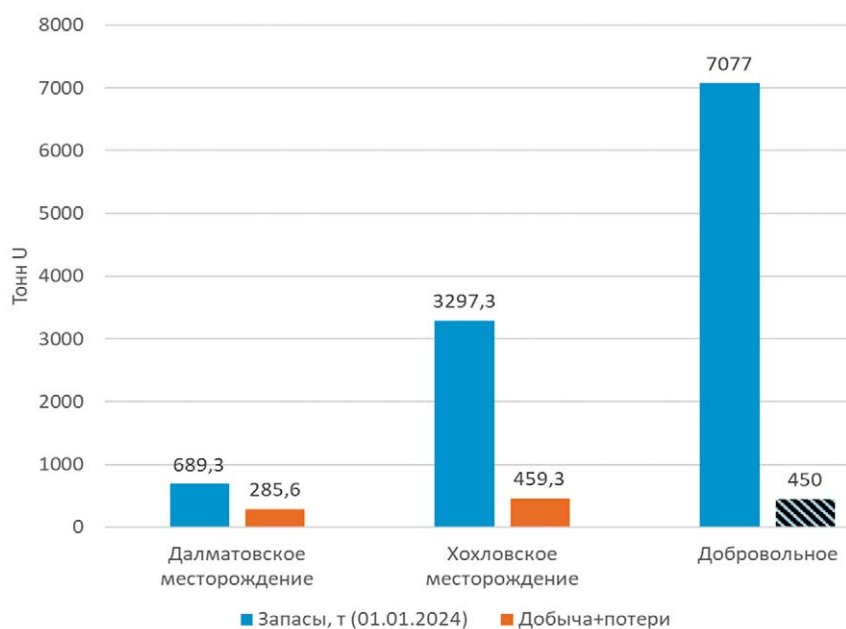


Рис. 1. Графики запасов и добычи по месторождениям предприятия АО «Далур»

Площадь прогнозных работ расположена в Шумихинском районе Курганской области (Южное Зауралье), западнее Хохловского месторождения. Наиболее крупный населённый пункт – районный центр пгт. Шумиха – связан железнодорожной линией с областными центрами Челябинском и Курганом. В пределах контура работ развита сеть асфальтированных дорог, однако преобладают грунтовые дороги, пригодные для пере-



движения в сухое время года. Дневная поверхность плоскоравнинная, лесостепная. Большая часть территории занята сельскохозяйственными угодьями. Гидрографическая сеть района достаточно бедна.

Зауральский урановорудный район – западный фрагмент Западно-Сибирского урановорудного пояса с экзогенно-эпигенетическим урановым оруденением в палеодолинах средне-верхнеюрского возраста.

В тектоническом отношении район приурочен к краевой части Западно-Сибирской плиты, примыкающей к Уральской складчатой системе герцинского возраста на стыке Зауральского поднятия и Тюменско-Кустанайского прогиба [2].

В геологическом строении территории принимают участие образования двух структурных этажей: силурийско-верхнепалеозойского и мезозойско-кайнозойского. Фундамент сложен преимущественно породами силура, девона и карбона. Палеозойские образования дислоцированы в пределах поднятий, иногда прорваны интрузиями палеозойского возраста.

В фундамент врезаны эрозионные речные палеодолины средне-позднеюрского возраста. Глубина вреза обычно не превышает 150 м. Ширина палеодолин достигает 2-5 км. Направление основных наиболее крупных долин согласное с общим наклоном поверхности фундамента. К ним примыкает большое количество палеопритоков различных направлений (рис. 2). Эрозионные палеодолины погребены под мощным чехлом меловых, палеогеновых и неоген-четвертичных отложений [1].

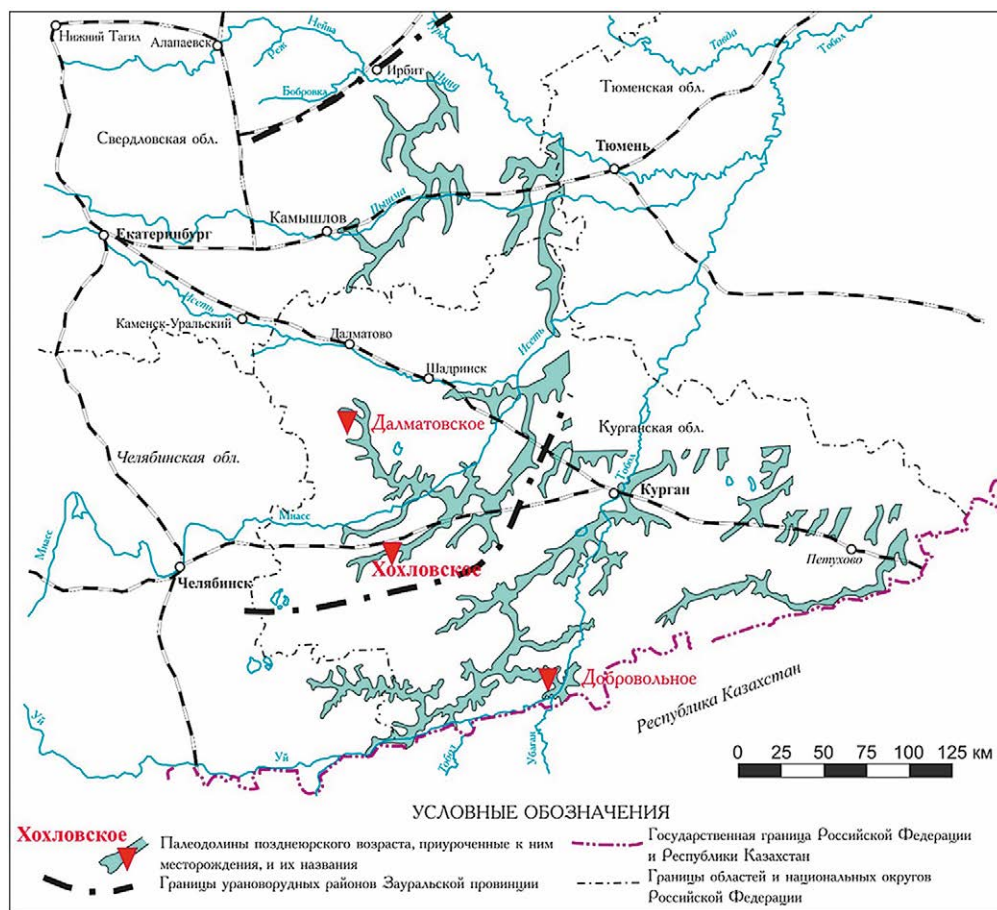


Рис. 2. Схематическая карта развития позднеюрских палеодолин Зауралья [5]

Металлогенический облик мезозойско-кайнозойских платформенных отложений Зауральского региона характеризуется наличием месторождений железа и бокситов, древних титан-циркониевых россыпей, а также золота, месторождений бурого угля, огнеупорных глин, строительного сырья и подземных вод [3].

В ходе прогнозно-аналитических работ были проанализированы гравиметрическая, сейсмическая и буровая изученность Хохловской палеоструктуры. Специалистами геофизического отдела была переобработана гравиметрическая съемка масштаба 1:200 000 и составлена карта локальных аномалий поля силы тяжести. На полученной карте отчетливо выделяется уже известная палеодолина, а также намечаются предполагаемые нами палеопритоки, перспективные на обнаружение уранового оруденения. Сейсмопрофили, пройденные предшественниками, имеют направление преимущественно вкост основной палеодолины, что не позволило откартировать предполагаемые палеопритоки, выделяемые по гравиметрической съемке. Также в верховье Хохловской палеодолины отсутствует ранее проведенное поисковые бурение на наиболее перспективном участке между профилями IX, IX+4000 и VII (рис. 3).

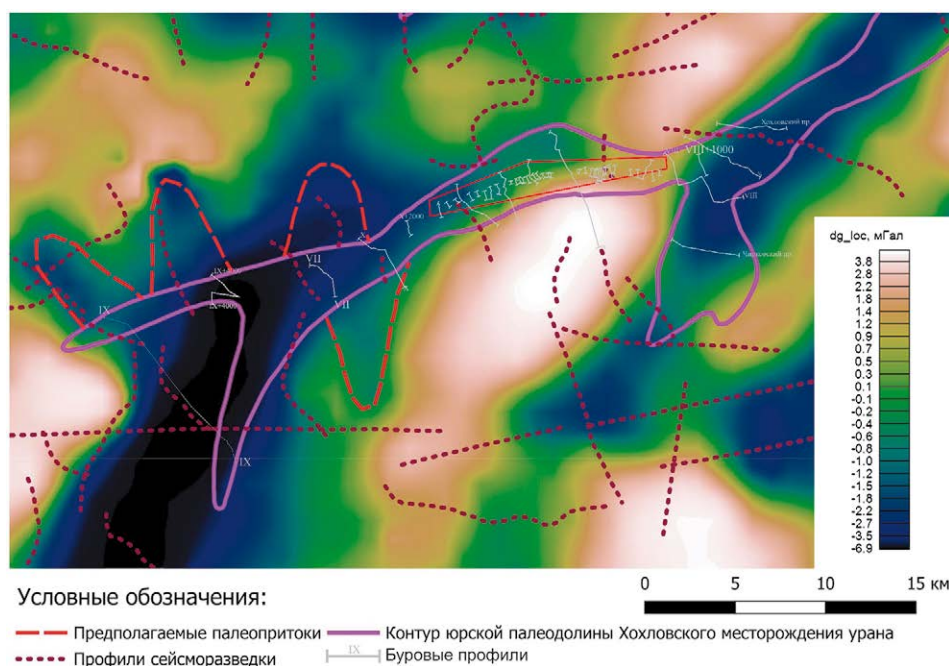


Рис. 3. Карта локальных аномалий поля силы тяжести со схематично нанесенными профилями бурения и сейсморазведки, предполагаемыми притоками, контуром палеодолины Хохловского месторождения

Фундамент на изучаемой территории залегает на глубинах от 50 до 800 м и имеет общий уклон на северо-восток. Он представлен в различной степени метаморфизованными породами среднего-позднего палеозоя – песчаниками, углисто- и графитисто-кварцевыми, серицито-глинистыми и глинистыми сланцами, известняками, алевролитами, аргиллитами, а также базальтами триаса, образующими лавовые покровы, залегающими с угловым несогласием на нижележащих образованиях. Интрузивные образования в породах фундамента имеют ограниченное развитие и представлены позднепалеозойскими гранитоидами, слагающими Шумихинский гранитный массив, расположенный в ядре Боброво-Шумихинского антиклинория, в верховьях Хохловской палеодолины [2].





Учитывая наличие уранового оруденения, низкую степень опосредованности верховьев Хохловского палеорула, необходимость заверки результатов среднемасштабных гравиметрических работ более детальными исследованиями и возможность обнаружения рудоносных палеопритоков, выделена Воробьевская площадь (680 км<sup>2</sup>) для дальнейших ГРП (рис. 5).

В 2024 г. для совершенствования комплекса методов поиска уранового оруденения палеодолинного типа на территории Зауральского региона были проведены опытно-методические работы на Верхне-Уксянской залежи Далматовского месторождения урана. Для решения поставленной цели было запланировано апробировать:

- структурно-геофизические методы в площадном варианте для картирования рудовмещающих палеоструктур;
- атмогеохимические и изотопно-почвенные методы в площадном варианте для картирования рудных залежей.

Гравиметрические работы выполнены в площадном варианте по предварительно проложенной топосети с шагом 100 м при расстоянии 200 м между профилями. Были произведены измерения на 167 пунктах, расположенных на 8 профилях протяженностью 2000 м.

Постановка геохимических методов была осложнена наличием разных ландшафтных обстановок на запланированных профилях, а также участками сельскохозяйственных пашен. Перед постановкой геохимических методов была проведена рекогносцировка, которая включала изучение почвенных горизонтов в подготовленных закопушках в разных ландшафтных обстановках.

После изучения закопушек были скорректированы планы отбора литогеохимических проб и установки сорбционных детекторов. Были отобраны пробы почв – 270 штук (в том числе 26 проб контроля) на 4 профилях (№№ 2, 3, 4, 8). Установлен 371 сорбционный детектор (в том числе 32 детектора контроля) на 5 профилях (№№ 2, 3, 4, 6, 8). Проведены

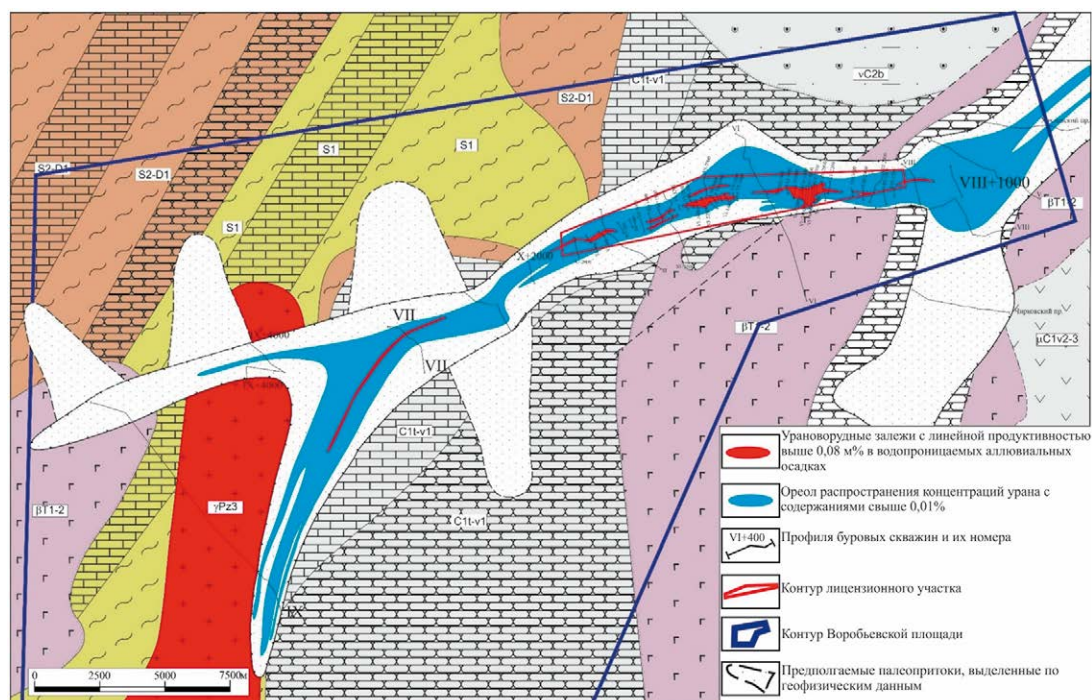


Рис. 5. Геолого-структурная карта фундамента (со снятым осадочным чехлом) с контурами Воробьевской площади, Хохловской палеодолины и предполагаемыми притоками (по материалам Ладейщикова А.В. [6])

измерения радона в 371 точке (в том числе 32 контрольных точки) на 5 профилях (№ 2, 3, 4, 6, 8). Все геохимические методы проводились с шагом 25 м над долиной, и с шагом 50 м в бортах; длина профилей работ 2 км.

По результатам камеральной обработки результатов геофизических и геохимических методов (рис. 6, 7) были сделаны нижеследующие выводы.

1. Гравиразведка позволяет картировать погребенные палеорусловые структуры на глубинах до 600 метров, им соответствуют отрицательные локальные аномалии поля силы тяжести.

2. С помощью изотопно-почвенной съемки можно определять положение рудных тел, учитывая возможные смещения аномальных значений внутри границ палеорусловых структур.

3. Анализ данных радонометрии выявил закономерность увеличения средне-профильных значений от безрудных участков палеодолины к более широкой области проявления балансового оруденения. Учитывая это, с помощью эманационного метода во время поисков урановых объектов песчаникового типа можно локализовывать перспективные участки.

По результатам ОМР выбран комплекс опережающих методов для дальнейших ГРР, включающий площадную гравиметрическую съемку по сети 400 x 200 м и геохимическую съемку по сети 400 x 25 м. Шаг съемок скорректирован с учетом пространственных характеристик искомым палеоструктур и рудных залежей Зауральского района (таблица 1).

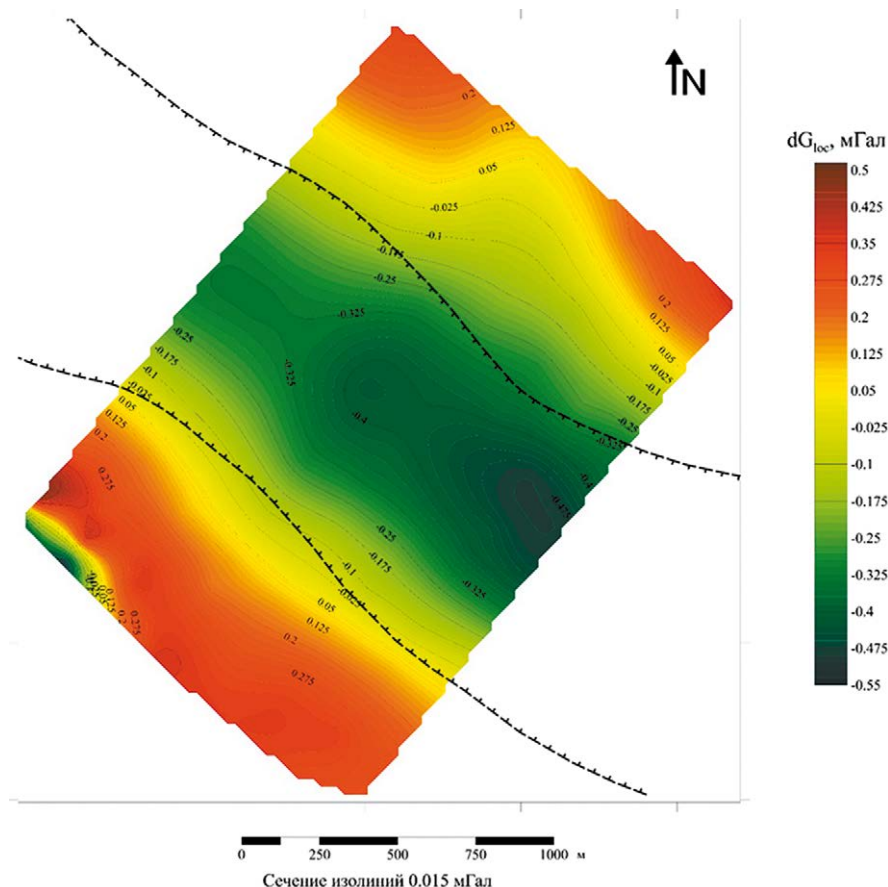


Рис. 6. Карта локальных аномалий поля силы тяжести (пунктиром показаны границы палеодолины в районе Верхне-Уксянской залежи Далматовского месторождения)

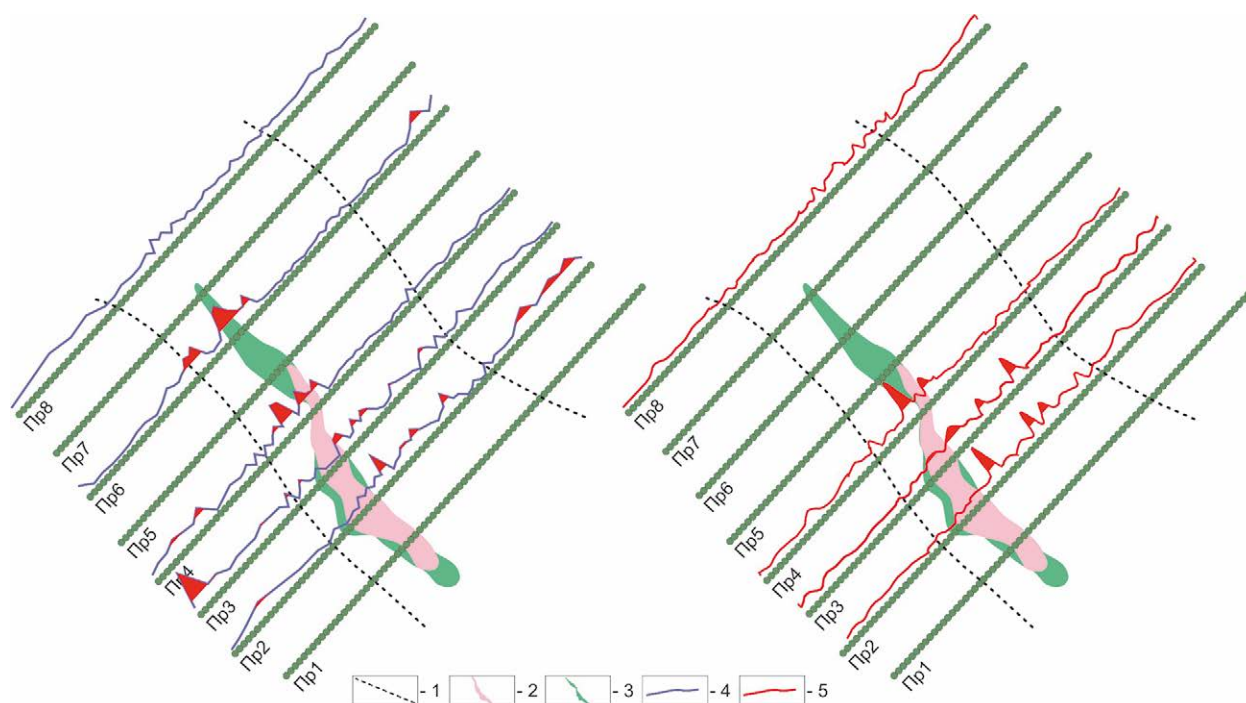


Рис. 7. Схема площади работ с графиками результатов радонометрии и ИПМ по профилям  
 1 – границы палеодолины, подтвержденные бурением; 2 – проекция рудного тела на плоскость;  
 3 – проекция оруденения с забалансовым содержанием урана; 4 – графики результатов радонометрии,  
 5 – график мультипликатива по  $P_0$  и  $P_b$

Таблица 1. Пространственные характеристики палеоструктур и рудных залежей месторождений далматовского типа

| Месторождения далматовского типа |             |                      |             |
|----------------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Палеопритоки                     |             | Урановорудные залежи |             |
| Мин. длина                       | Мин. ширина | Мин. длина           | Мин. ширина |
| 2 км                             | 500 м       | 1300 м               | 100 м       |

Для выявления уранового оруденения палеодолинного типа на выделенной перспективной Воробьевской площади, учитывая ее размеры (680 км<sup>2</sup>), рекомендуется проведение ГРР, включающих следующие виды, объемы и стадийность работ:

- гравиметрическая съемка для картирования палеопристок и уточнения границ стволной палеодолины (11 800 ф.т.);
- геохимические методы для локализации перспективных участков и определения положения рудных тел: (эманационная съемка – 14 000 ф.т., изотопно-почвенный метод – 14 000 ф.т.);
- заверочное бурение (около 20 000 пог. м).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона / М.: ВИМС, 2008. – 145 с. Сост. А.Б. Халезов (ФГУП «ВИМС»).



- 2) Малютин Н.Б. и др. Геологическое строение складчатого фундамента в Среднем Зауралье. М.: Недра, 1977. – 223 с.
- 3) Быков Э.Н., Шмелев Ю.С., Кукушкин Ю.М. и др. Результаты геолого-прогнозных исследований масштаба 1:200 000 на комплексное (уран, скандий, рений, иттрий и др.) оруденение по Белоярской площади среднего-южного Зауралья. Листы О-41-XXV, XXVI, XXXI, XXXII, N-41-II, III, VIII, IX, XIV, XV. Екатеринбург, 1995.
- 4) Ситникова З.И., Папулов Г.Н., Эдигер И.С., Амон Э.О. Опорный разрез меловых отложений южной части Зауральской структурно-фациальной зоны (Курганское Зауралье) / Отв. ред. Г.Н. Папулов, Б.И. Чувашов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. – 140 с.
- 5) Прогнозно-геологические работы масштаба 1:200 000 с рекогносцировочными поисками месторождений урана палеодолинного типа на Варгашинско-Петуховской площади Зауралья / Отчет Центральной Уральской партии № 75 за 2000-2004 гг. С.П. Еремеев, Л.П. Дидковская, И.П. Зайцев. Екатеринбург, 2004.
- 6) Информационный отчет о результатах незавершенных работ по объекту: Геологоразведочные работы по оценке промышленной значимости Хохловского месторождения урана за 1999-2003 гг. / С.Н. Марков, А.В. Ладейщиков, Г.Ю. Попонина. Новопетровское, 2003.

## СТРУКТУРНАЯ ГЕОХИМИЯ С ПОЗИЦИЙ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Мессерман И.З.  
МГРИ, Москва

С позиций системного подхода рудоносность рассматривается как иерархическая система условно неделимых элементов неоднородности, разномасштабных рудных образований, объединенных своей, характерной для данного уровня системы, структурой связи [2, 3]. Так, на представленной схеме (рис. 1) наблюдается система неоднородностей рудных образований в пределах рудного района, сопоставимых по размерам с рудными узлами (сотни км<sup>2</sup>), рудными полями (десятки км<sup>2</sup>), месторождениями и рудопроявлениями, которые отличаются собственной связью с элементами геологического строения изучаемой площади.

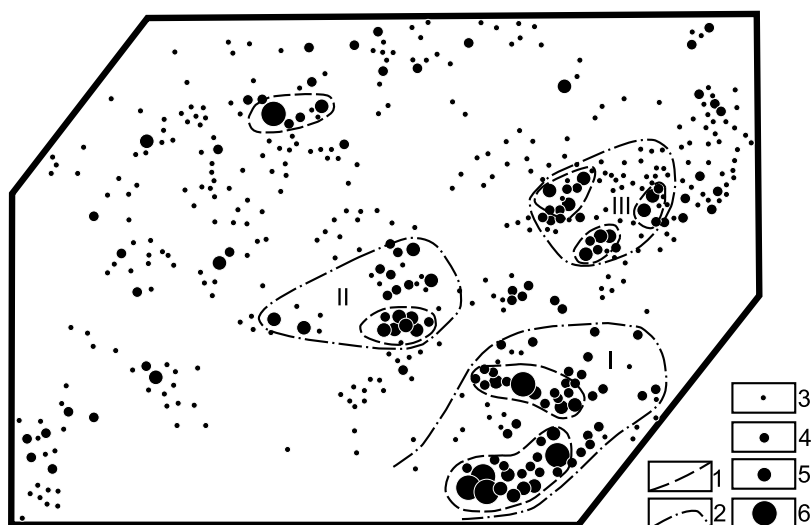


Рис. 1. Схема иерархии рудных образований в рудном районе

Основанием применения системного подхода послужил ряд существующих недостатков методов локального прогнозирования при обработке литохимических данных, заметно снижающих их эффективность при использовании:

- несоизмеримость объектов исследований и отбираемых проб;
- независимо от масштабов поисков их направленность на выявление и оценку только конечных объектов поисков — рудных месторождений, что приводит к нарушению условий соразмерности используемых геологических предпосылок рудоносности оцениваемых рудных объектов, особенно на ранних стадиях работ;
- при изучении недр рудные месторождения рассматриваются как пространственно независимые аномалии, а не как закономерные концентрации рудного вещества;
- в большинстве предложенных методов количественная обработка данных сводится к получению одномерных или многомерных статистических характеристик, независимых от пространственных координат и без геометрических баз их измерений, а при применении ресурсов — в пределах выделяемых контуров.

С позиций системного подхода понятие структурная геохимия должно определять закономерности пространственного распределения прогнозируемого рудного образова-

ния определенного масштабного уровня, размещения комплекса химических элементов, оценку корреляционной зависимости, понятную интерпретацию на основе геологической информации, оценку прогнозных ресурсов в пределах выделяемых контуров. Применение системного подхода при обработке и интерпретации геохимических данных позволяет выделять в рамках качественно однородных уровней организации вещества земной коры ряд дополнительных количественных характеристик рудных образований разных масштабных уровней строения [2, 4].

Для решения поставленных задач обработка геохимических данных, выделение и количественная оценка пространственных закономерностей заданного иерархического уровня строения геохимических полей, выделяемых заданной сетью наблюдений, производилась на основании выявления закономерной составляющей простым и надежным методом тренд-анализа с помощью статистического скользящего окна. При этом размеры и форма скользящего окна должны быть сопоставимы с элементами неоднородности изучаемого иерархического уровня, а минимальное число точек в окне должно обеспечивать вычисление устойчивого среднего квадратичного отклонения оценки математического ожидания оцениваемого признака [2, 3].

Выбор окон сглаживания является важной операцией при геохимических исследованиях разных масштабов. На основании экспериментальных исследований [23], с корректировкой размеров при помощи двумерных автокорреляционных функций целесообразно использование следующих размеров окон сглаживания: 100 x 100 – 50 x 50 км при оценке рудных районов, 20 x 20 – 10 x 10 км при оценке рудных узлов, 5 x 5 – 3 x 3 км при оценке рудных полей, 1 x 1 – 0,5 x 0,5 км при оценке рудных месторождений, 0,5 x 0,5 – 0,1 x 0,1 км при оценке рудоносных блоков и зон в пределах месторождений [2, 3].

В настоящей работе приведены примеры обработки и интерпретации геохимических данных при изучении золоторудных площадей разных масштабных уровней и промышленных типов.

На рис. 2 и 3 приведено сопоставление геологического строения Кубакинского золоторудного узла с результатами концентраций  $Th$  при обработке материалов АГСМ-съемки, которое свидетельствует о возможности использования результатов при геологическом картировании. Сопоставление показывает, что распределение содержаний  $Th$ , выполненное окном сглаживания 1 x 1 км, позволяет выделить по уровню концентраций различные типы пород, отразить закономерности их пространственного распространения, предположить влияние разрывных структур на основании резких линейных градиентов изменения изучаемого поля.

Применение многомерных классификаций по данным генерализации исходной геохимической информации окнами сглаживания позволяет разделять изучаемую территорию на ряд однородных участков, отличающихся характером геохимических ассоциаций соответствующего масштабного уровня. На рис. 4 приведена схема геохимического районирования Кубакинского золоторудного узла по результатам многомерного анализа данных литохимической съемки 1:50 000 с применением окна 5 x 5 км, где каждый выделяемый участок представлен мажоритарным рядом элементов по степени убывания. Наблюдается разделение рудного узла на два блока – преимущественного распространения рудных полей золоторудной геохимической ассоциации ( $Au-Ag-As$ ) и вулканогенных формаций, а также редкометальных геохимических ассоциаций ( $Mo-W$ ) и интрузивных гранитоидных комплексов.



Рис. 2. Схема геологического строения рудного района

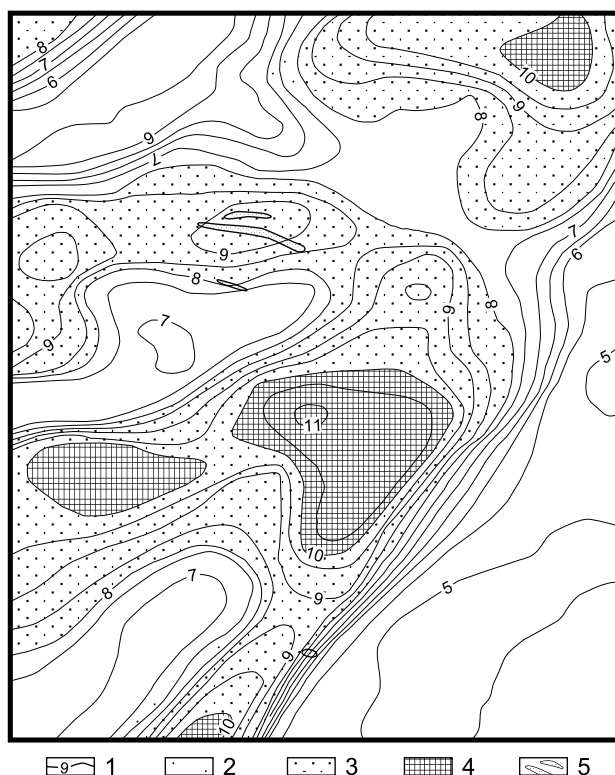


Рис. 3. Распределение концентраций тория (окно сглаживания 1 x 1 км)

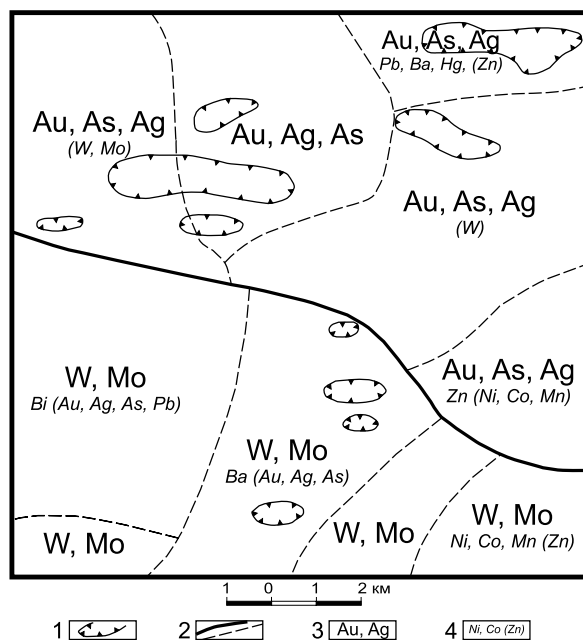


Рис. 4. Схема геохимического районирования Кубакинского рудного узла

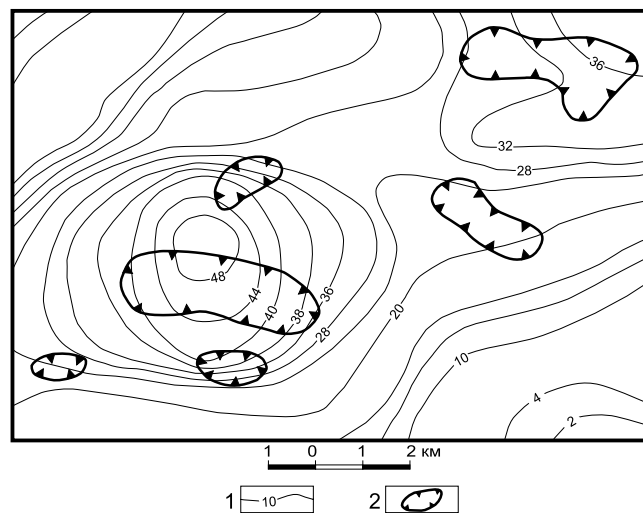


Рис. 5. Распределение концентраций золота для рудного поля (окно сглаживания 5 x 5 км)

1 – изолинии концентраций Au (в кларках),  
2 – контуры известных и потенциальных золоторудных месторождений.

Выполнено по результатам литогеохимической съемки м-ба 1:50 000

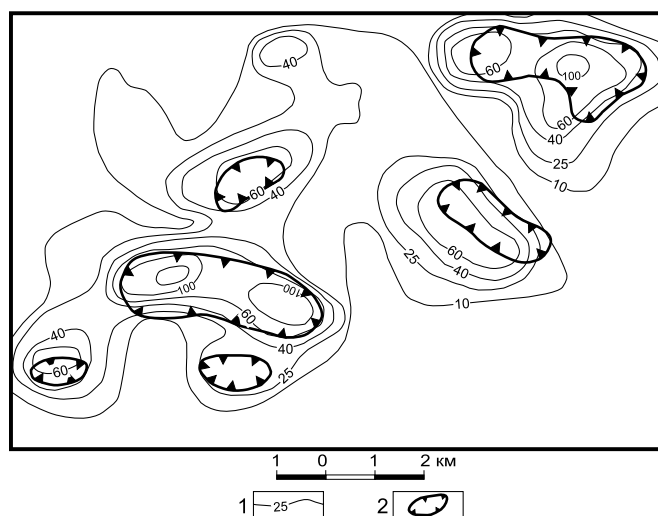


Рис. 6. Распределение золоторудных месторождений в пределах рудного поля (окно сглаживания 1 x 1 км)

1 — изолинии концентраций  $Au$  (в кларках),  
2 — контуры известных и потенциальных месторождений и рудопроявлений золота

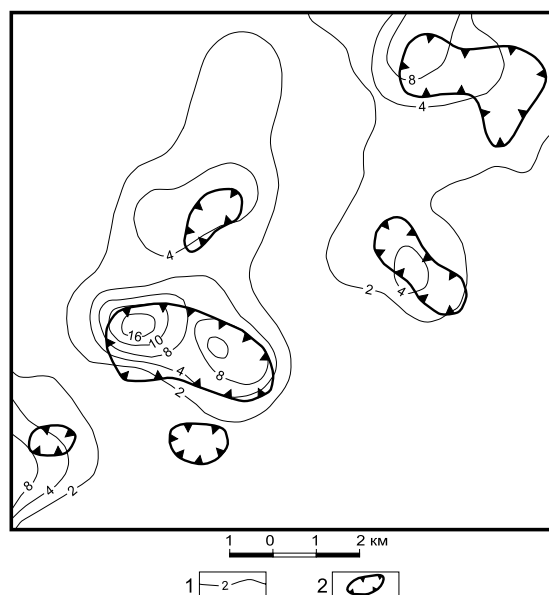


Рис. 7. Распределение концентраций серебра (окно сглаживания 1 x 1 км)

1 — изолинии концентраций  $Ag$  (в кларках),  
2 — контуры известных и потенциальных месторождений и рудопроявлений золота

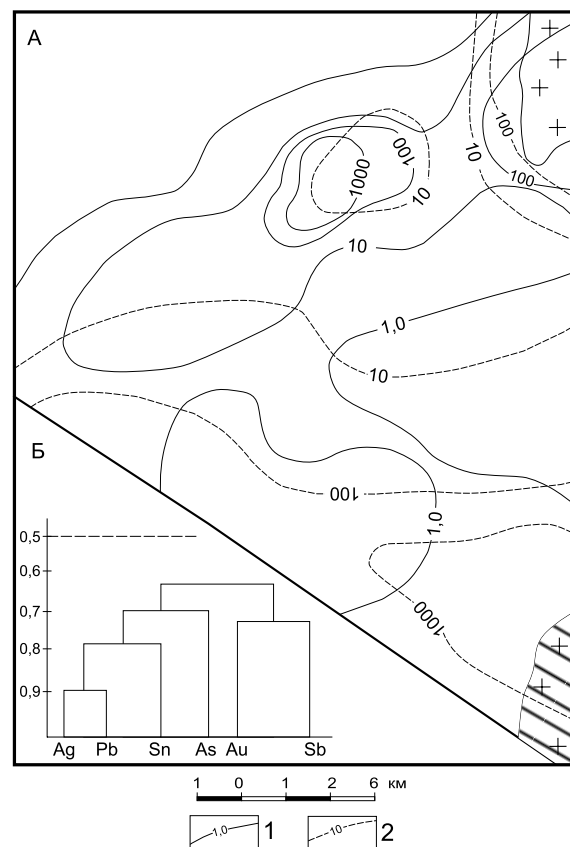


Рис. 8. Майский рудный узел. Геохимические ассоциации рудного поля (окно сглаживания 5 x 5 км)

Изменение окна сглаживания приводит к закономерному изменению пространственных ориентировок рудных образований различного масштабного уровня. Об этом свидетельствуют результаты обработки данных литохимической съемки м-ба 1:50 000 Кубакинского рудного узла окнами сглаживания 5 x 5 и 1 x 1 км (рис. 5, 6).

Выявление элементов-индикаторов оруденения, геохимических ассоциаций определенного масштабного уровня, оценка их пространственного распространения производится при визуальном сопоставлении моноэлементных карт химических элементов одного масштабного уровня. Поскольку изоконцентрации элементов представляют собой детерминированные функции пространственных координат, одинаковые масштабы их проявления и закономерности пространственного размещения убедительно свидетельствуют о принадлежности к единой ассоциации (рис. 6, 7).

Пространственное совмещение концентраций золота (см. рис. 5) и серебра (см. рис. 6) свидетельствует о высокой корреляционной зависимости этих элементов для рассматриваемого золото-серебряного месторождения.

При этом изменение окна сглаживания приводит к закономерному изменению не только пространственных ориентировок рудных образований различного масштаба, но и к изменению характера геохимических ассоциаций. Так, для Майского золоторудного месторождения, где установлена высокая корреляционная зависимость  $Au-As-Sb$ , учитывая приуроченность золота к тонкоигльчатому арсенопириту и широкое развитие антимонитовых жил на месторождении, обработка результатов литохимической съемки м-ба 1:50 000, генерализованных окном сглаживания 5 x 5 км, а также результаты кластерного анализа свидетельствуют о распространении двух геохимических ассоциаций –  $Au-Sb$  и  $Sn-Ag-As-Pb$  со смещенными центрами максимального распространения относительно гранитоидных массивов (см. рис. 8). Это связано с широким распространением в районе убогой фоновой олово-сульфидной минерализации, представленной касситеритом, крупнокристаллическим арсенопиритом, полиметаллической и сульфосолевой минерализацией.

Обработка и интерпретация результатов АГСМ-съемок позволяет оценить степень проявленности метасоматических процессов и их масштабности по нарушению (снижению) корреляционных зависимостей пар радиоактивных элементов в пределах скользящих окон сглаживания, соизмеримых с оцениваемыми рудными образованиями. Для золоторудных месторождений наиболее эффективно использование парной корреляции  $K-Th$ .

Как следует из рис. 9, золоторудные поля приурочены к площадям снижения корреляционной зависимости  $K-Th$  в пределах 0,3-0,9 при обработке данных окном сглаживания 5 x 5 км, а использование окна сглаживания 1 x 1 км позволило по данным АГСМ не только установить с высокой точностью контур Кубакинского месторождения, но и определить положение наиболее значительных рудоносных зон по снижению коэффициента корреляции в пределах 0,1-0,7 (рис. 10).

При оценке интенсивности рудообразующих процессов важное значение имеет выявление групп химических элементов, обладающих стабильным поведением в пределах рудных объектов разных масштабных уровней, изучаемых на стадиях локального прогнозирования, разведки и подсчета запасов. Наряду с элементами-индикаторами оруденения установлена важная роль сидерофильной группы элементов  $Co-Ni-Mn-Mg-Ti-V-Sc$ , а также ряда петрогенных элементов, которые обладают тенденцией к выносу или деконцентрации в пределах рудных объектов [4]. Однако количественная оценка степени проявленности ореолов выноса химических элементов при использовании литохимических методов, и, соответственно, оценка интенсивности процессов рудообразования затруднена, что и определяет их относительно редкое, достаточно достоверное описание и фиксацию. Это связано с методикой оценки литохимических ореолов, основанной на статистической оценке и оконтуривании литохимических аномалий, обычно применяющейся для резко контрастных рудогенных элементов, однако неэффективных при оценке слабоизменчивых концентраций порообразующих, петрогенных или определяющих кислотность-щелочность растворов, элементов кларковых рядов А и В геохимического ряда концентрационной зональности [6], обычно определяющих группы элементов выноса. В качестве наиболее информативного метода при решении прикладных задач геологоразведки применяется совместное использование комплекса химических



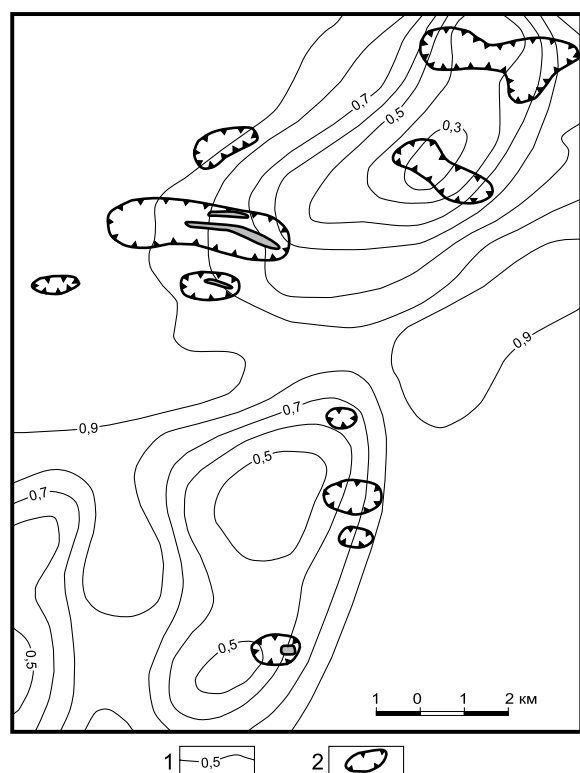


Рис. 9. Распределение рангового коэффициента корреляции  $K-Th$  (окно сглаживания 5 x 5 км)

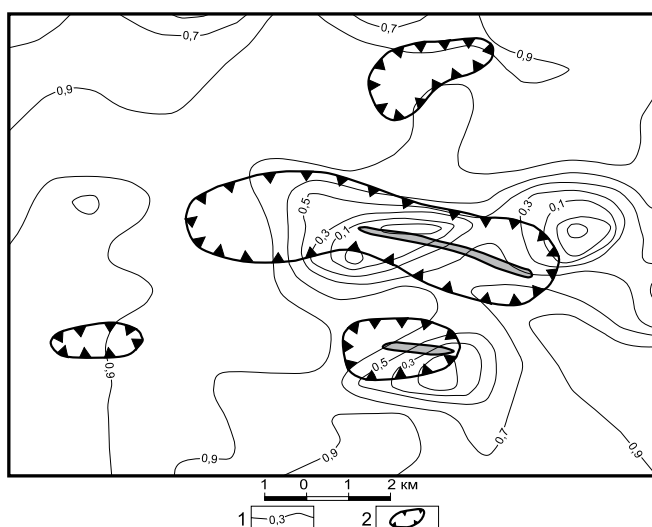


Рис. 10. Распределение рангового коэффициента корреляции  $K-Th$  (окно сглаживания 1 x 1 км)

элементов-индикаторов оруденения и элементов деконцентрации, характеризующих интенсивности метасоматических процессов в виде мультипликативных отношений, которые позволяют наиболее контрастно определять границы проявленности оруденения [2, 4]. Такие комплексы элементов обычно характеризуются высокой корреляционной зависимостью внутри группы и отрицательной – между группами. При этом характерно пространственное совмещение в проявленности указанных групп при обработке исходных данных методами тренд-анализа. Для золоторудного месторождения Светлое отмечалась связь золотого оруденения с площадным развитием выщелоченных, пористых монокварцитов с распространением зоны окисления на глубину. Интенсивное проявление метасоматических и окислительных процессов представлено закономерным снижением концентраций групп элементов  $Fe-Mg-Co-Mn$  и  $K-Na-Al$ . Это позволило использовать мультипликативное отношение  $Au^2/K \cdot Mg$  в качестве оптимального показателя интенсивности процессов рудообразования, резко увеличивающего контрастность оценки (рис. 11) при выделении наиболее перспективных объектов для проведения оценочных работ.

Для золоторудных месторождений, локализованных в терригенно-осадочных пиритизированных породах, в пределах рудных зон, сложенных лимонит-кварц-калишпатовыми метасоматитами по аркозовым песчаникам, наряду с  $Au$  отмечается целый ряд элементов-индикаторов оруденения ( $Ag, Mo, Sb$ ), а также элементов снижения концентраций. Применяемое бортовое содержание для оконтуривания рудных тел (рис. 12, 13) требует обоснованного выделения рудной зоны для применения коэффициента рудоносности, что может быть выполнено при использовании мультипликативного отношения с использованием ореолов деконцентрации  $Na, Mg, Zr$  (рис. 14, 15).

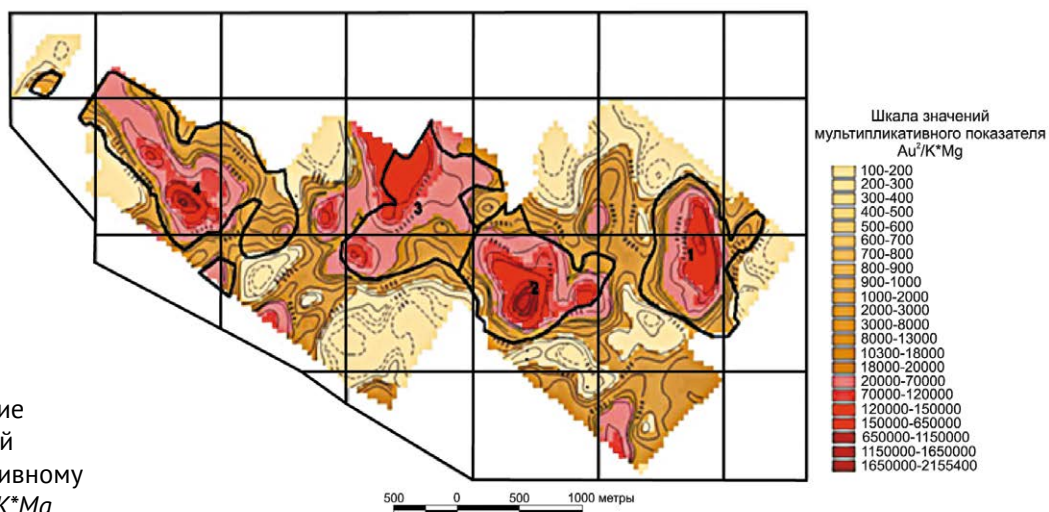


Рис. 11. Выделение рудных площадей по мультипликативному показателю  $Au^2/K \cdot Mg$

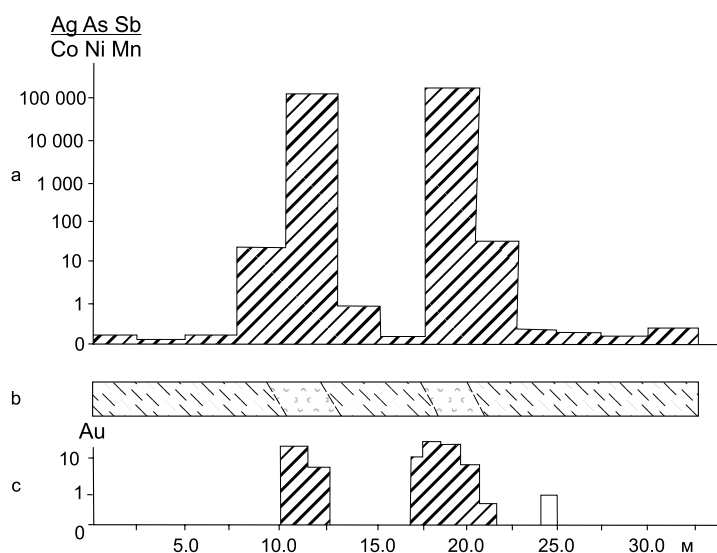


Рис. 12. Мультипликативное отношение по золоторудному пересечению в черносланцевых толщах для определения контура рудного тела при выборе оптимального бортового содержания (в условных единицах)

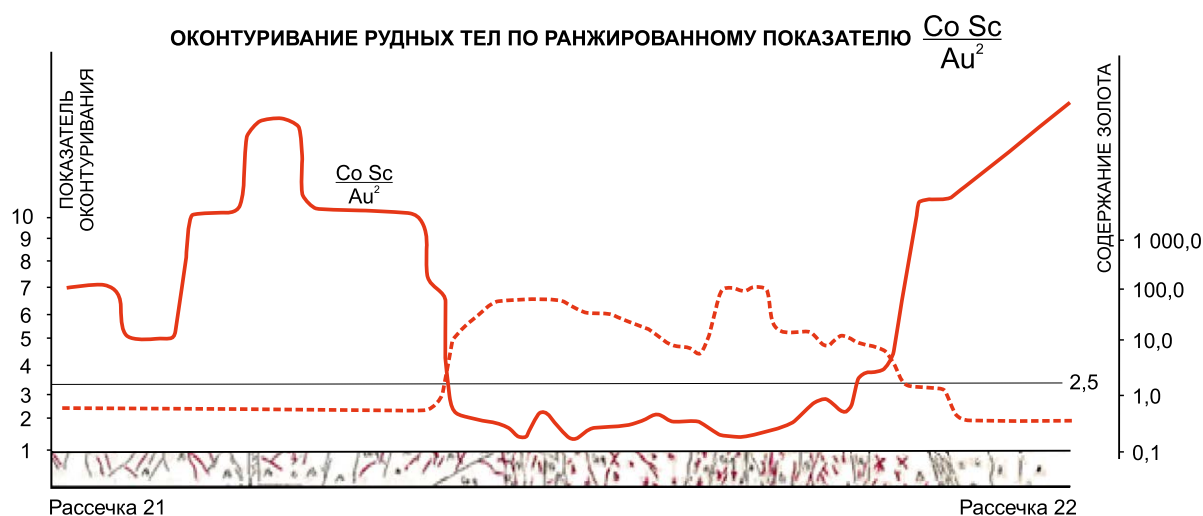
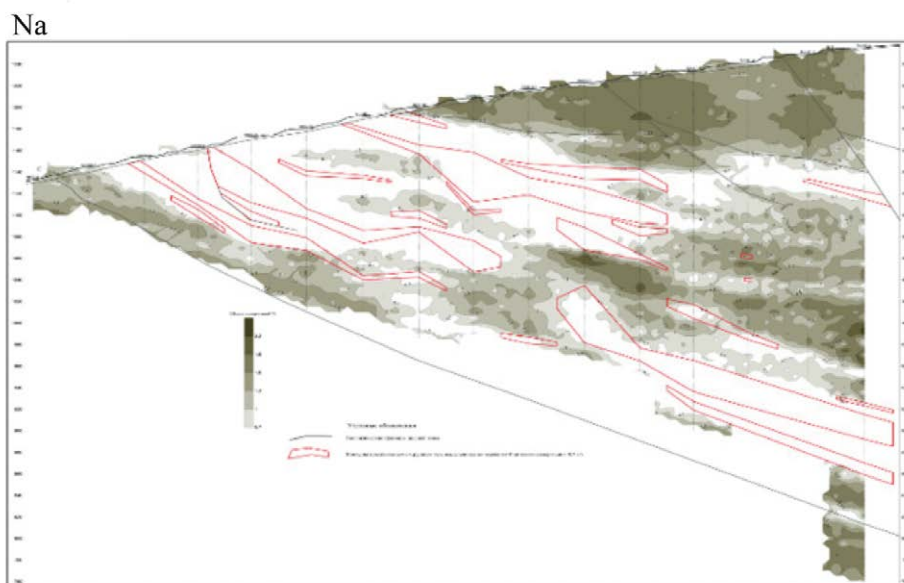


Рис. 13. Оконтуривание рудного тела золотосеребряного месторождения в вулканитах, концентрации золота в условных единицах  $Au$

Рис. 14. Распределение концентраций золота

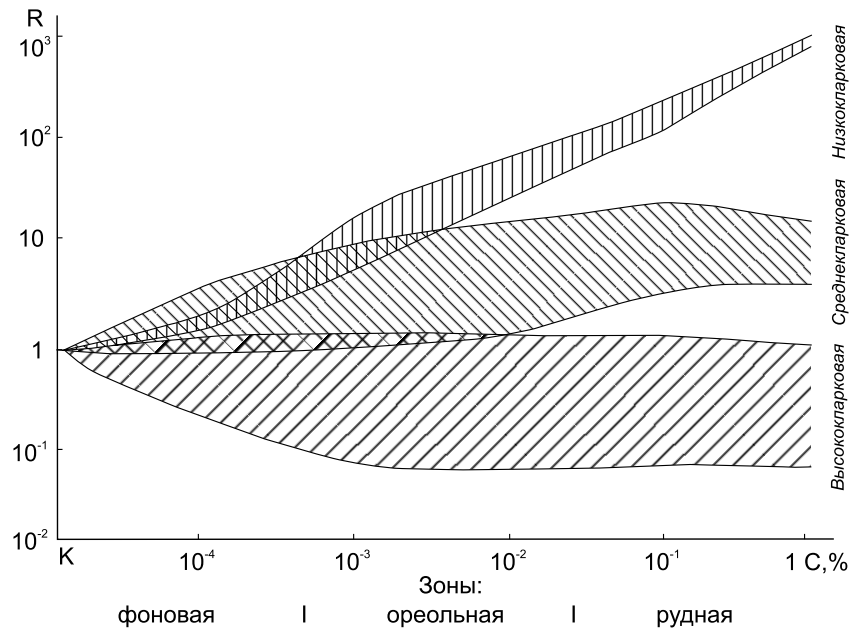


Рис. 15. Распределение концентраций натрия



В настоящей работе в основе методики оконтуривания областей потенциальной рудоносности по результатам геохимических исследований предлагается использование концентрационной зональности, установленной и описанной в работах Н.И. Сафронова, Л.Н. Овчинникова, Е.В. Плющева, В.В. Шатова и др. [6, 7, 8], которая заключается в формировании различных кларковых рядов химических элементов, отличающихся степенью концентрирования в процессах рудообразования (рис. 16). Коэффициент концентрации  $W$ , предложенный А.Е. Ферсманом [1, 8], характеризует среднее значение кларков концентрации всех элементов, входящих в определенные минералы рассматриваемого ряда, отражает суммарные энергетические затраты в процессах преобразования вещества, зависит от состава минерала и состава среды, в которой он рассматривается. В результате рудообразующие элементы, находящиеся в состоянии рассеяния или являющиеся микропримесями во внешних зонах иерархического ряда, создающие аксессуарную мине-

Рис. 16. Схема постепенного концентрирования кларковых рядов:  $K$  — кларки химических элементов различных кларковых рядов,  $R$  — степень концентрирования химических элементов [6]



рализацию в промежуточных зонах (на уровне металлогенических зон, районов, узлов), приобретают породообразующее значение во внутренних зонах иерархической системы (месторождениях, рудных зонах, рудных телах).

При этом объем растворов, определяющий распространение рассеянной минерализации в пределах обширных площадей, преобразуется и создает аномально высокие концентрации рудных элементов в пределах площадей промышленных рудных образований.

Фактически в общем виде  $K * V = C/K * v$ , где  $K$  — кларк элемента в состоянии рассеяния,  $C/K$  — кларк концентрации элемента в рудном образовании,  $V$  — объем распространения растворов в состоянии рассеяния элементов,  $v$  — объем рудных образований [4].

Решение проблем оконтуривания при оценке прогнозных ресурсов требует четкой иерархии структурных уровней рудоносных образований с позиций системного подхода, отражающей природные закономерности их размещения и статистического распределения в земной коре. Она сопоставима с рудоносными участками недр различных масштабных уровней и контролирующих их геолого-структурных элементов, при этом соответствует и требованиям горной промышленности в соответствии со стадийностью геологоразведочных работ [2, 5].

Результаты анализа изменчивости основных статистических параметров химических элементов, определяющих металлогеническую специализацию Восточно-Забайкальской провинции, в зависимости от размеров скользящих окон сглаживания, показывают незначительные отличия при сокращении размеров сглаживающего окна в изменении средних концентраций и медианных значений концентраций элементов (рис. 17) [2]. Некоторые отличия в характере изменения этих статистических параметров для ряда элементов ( $Au$ ,  $Sn$ ,  $Mo$ ), вероятно, связаны с логнормальным законом распределения. Однако резкое увеличение дисперсии определяется степенью избирательного группирования природной неоднородности рудообразующих элементов [2]. При этом характер изменения кривой дисперсии свидетельствует о наличии определенных элементов неоднородности по площади, наиболее оптимально выделяемых соответствующим размером окна сглаживания.

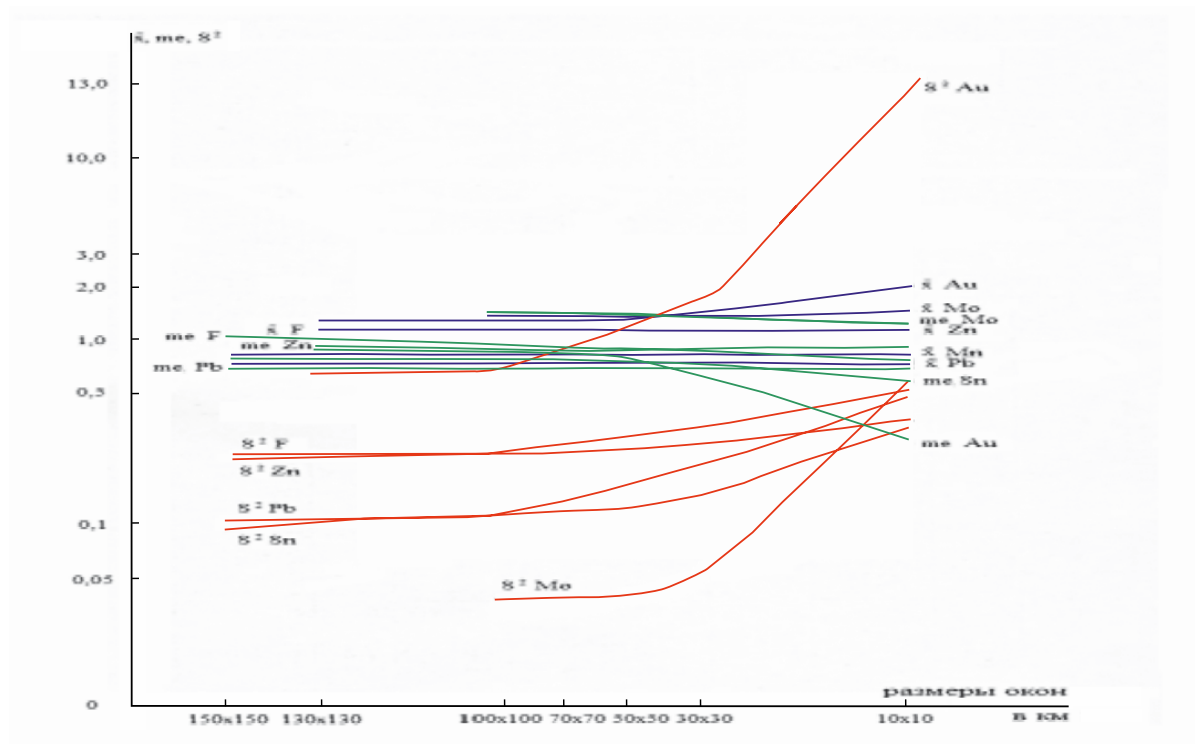


Рис. 17. Изменение статистических параметров в зависимости от размеров окон сглаживания (Восточно-Забайкальская провинция)

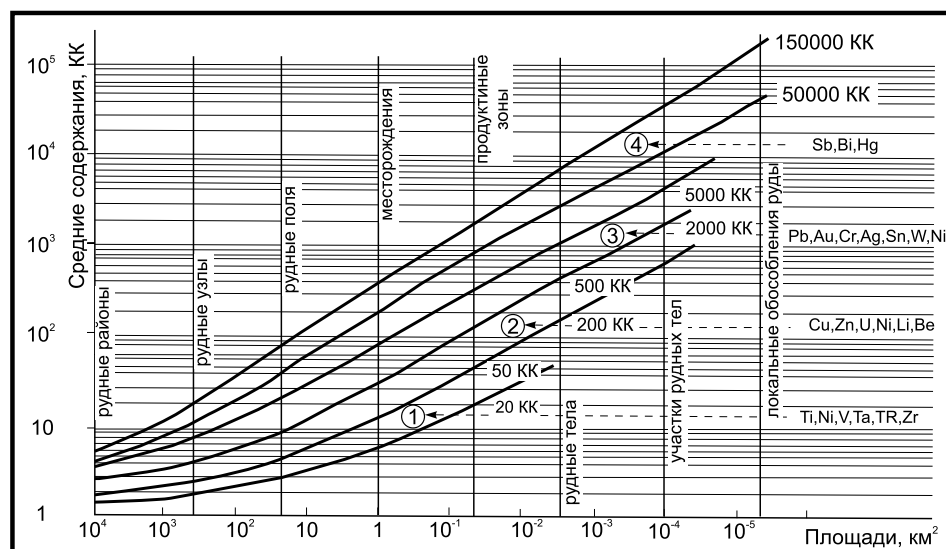


Рис. 18. Номограмма минимальных средних содержаний металлов в ореолах рудных образований различных иерархических уровней

1, 2, 3, 4 – интервалы средних содержаний металлов в ореолах, установленных по данным выполненным исследований

Таким образом, приведенные исследования подтверждают наличие функциональных связей между концентрациями химических элементов в рудоносных участках недр и их размерами, отражающими иерархические уровни рудоносных образований. На ос-

новании применения единой системы скользящих окон сглаживания при обработке геохимических данных соподчиненных масштабных уровней предлагается эмпирическая номограмма минимальных значений лимитных содержаний элементов для целей оконтуривания сглаженных ореолов потенциально рудоносных систем различных иерархических уровней (рис. 18), которая позволяет выполнить ориентировочную оценку вероятной промышленной значимости потенциальных рудных районов, узлов, полей и месторождений по средним содержаниям рудных элементов в сглаженных ореолах, которая может быть использована для оценки прогнозных ресурсов [2]. По оси ординат номограммы в логарифмическом масштабе отложены значения средних концентраций элементов-индикаторов оруденения в сглаженных литохимических ореолах, выраженные в кларках концентраций. По оси абсцисс, также в логарифмическом масштабе, показаны размеры площадей геохимических ореолов каждого иерархического уровня от рудного района до локального обособления, которые сопоставляются с площадями скользящих статистических окон, использованных при сопоставлении карт сглаженных ореолов конкретных иерархических уровней.

Применяемая методология позволяет не только оконтурить площади повышенных концентраций определенного масштабного уровня, но и обосновать закономерности их пространственного распределения в соответствии с геолого-структурными условиями локализации, дать количественную оценку ресурсов в пределах прогнозируемого объема, что является основанием для достоверной оценки прогнозных ресурсов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Зуев В.В. Обоснование физической сущности энергетических коэффициентов Ферсмана, их модернизация и использование в современной кристаллохимии минералов // Обогащение руд. – 2010. – № 5. – С. 18-24.
- 2) Каждан А.Б., Мессерман И.З., Лаврова Т.Ю. Методические рекомендации по сбору и компьютерной обработке геологической, геофизической и геохимической информации / Комитет по геологии и использованию недр РФ, Московская Государственная геологоразведочная академия, 1995. – С. 10-29.
- 3) Мессерман И.З., Пахомов В.И. Методика обработки геохимической информации на примере рудного поля // В сб. «Методы прикладной геохимии». Иркутск. – 1982. С. 202-203.
- 4) Мессерман И.З., Яшина В.И. Системный подход при обработке и интерпретации геохимической информации // Московский экономический журнал. – 2019. – № 8.
- 5) «Об утверждении Классификации запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых». Приказ Министерства природных ресурсов РФ от 11.12.2006 г. № 278.
- 6) Плющев Е.В., Шатов В.В. Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. Л.: Недра. – 1985. – С. 24-85.
- 7) Сафронов Н.И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л.: Недра. Ленингр. отд-ние, 1971. – 216 с.
- 8) Ферсман А.Е. Избранные труды. Том IV. М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 588 с.
- 9) Григоров С.А. Нелинейная структура геохимического поля рудообразующей системы (структурная геохимия). М.: ИМГРЭ. – 2015. – 149 с.
- 10) Гольдберг И.С., Абрамсон Г.Я., Лось В.Л. Геохимический образ рудных объектов от региональных до локальных, основа прогноза и поисков рудных месторождений // Материалы конференции. М.: ИМГРЭ, 2013. – С. 9-10.



## ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

Михеева Е.Д., Курбанов И.Н., Табаков Н.М.

ФГБУ «ВИМС», Москва

*mikheeva.ed@vims-geo.ru, kurbanov.in@vims-geo.ru, tabakov.nm@vims-geo.ru*

### PROSPECTS FOR THE IDENTIFICATION OF HYDROMINERAL RAW IN THE NORTHWESTERN FEDERAL DISTRICT

**Аннотация.** В статье дано определение и представлены характеристики гидроминерального сырья. Приведены экономические показатели и минерально-сырьевая база йода России. Выявлены перспективные объекты гидроминерального сырья в пределах Северо-Западного федерального округа.

Представлена информация об основных перспективных водоносных горизонтах (каменноугольный, среднедевонский, верхне-среднекембрийский и венд-рифейский) различной степени минерализации подземных вод с повышенными содержаниями йода, брома, стронция и лития.

**Ключевые слова:** гидроминеральное сырье, йод, литий, перспективные площади, содержание, Северо-Западный федеральный округ.

**Summary:** The article defines and presents the characteristics of hydromineral raw materials. Economic indicators and mineral and raw material base of iodine in Russia are given. Promising objects of hydro-mineral raw materials within the Northwest Federal District were identified.

The article presents information about the main promising aquifers (carboniferous, middle devonian, upper-middle cambrian and vendian-rhine) with different degrees of groundwater mineralization with increased contents of iodine, bromine, strontium and lithium.

**Keywords:** hydromineral raw materials, iodine, lithium, prospective areas, content, Northwestern Federal District.

*Гидроминеральное сырье (ГМС)* — подземные солёные воды, количество и качество которых позволяют в конкретных геологических и гидрогеологических условиях вести рентабельную добычу полезного ископаемого с помощью современных технических средств и процессов [1] (с поправками Е.Д. Михеевой).

ГМС характеризуется:

- широким региональным распространением;
- высоким ресурсным потенциалом;
- большими эксплуатационными запасами;
- возможностью восполняемости запасов;
- комплексным составом полезных компонентов;
- малоотходным и экологически чистым получением полезных компонентов;
- бальнеологическими свойствами;
- теплоэнергетическим потенциалом.

Для определения перспективности добычи полезных компонентов из подземных вод используются следующие минимальные промышленные содержания (мг/л):

для йода – 18, для совместной добычи йода и брома – 10 и 200 соответственно, для лития – 10.

Из ГМС возможно получение соединений магния, кальция, натрия, калия, йода, брома, бора, лития, рубидия, стронция, цезия, серы и даже радия-226.

Добыча лития из подземных вод в настоящее время ведется отдельными недропользователями, по этой причине статье особое внимание уделено йоду.

### Почему йод?

Большая часть мировых запасов йода поступает из трех регионов: чилийских пустынных нитратных рудников, газовых и нефтяных месторождений в Японии, а также богатых йодом соляных скважин на северо-западе Оклахомы (США).

Мировыми лидерами по производству элементарного йода являются (тонн, по состоянию на 2023 г.): Чили (19 000), Япония (9 000), Туркменистан (800), Иран (700), Азербайджан (200), Индонезия (30) [2, 3] (рис. 1).

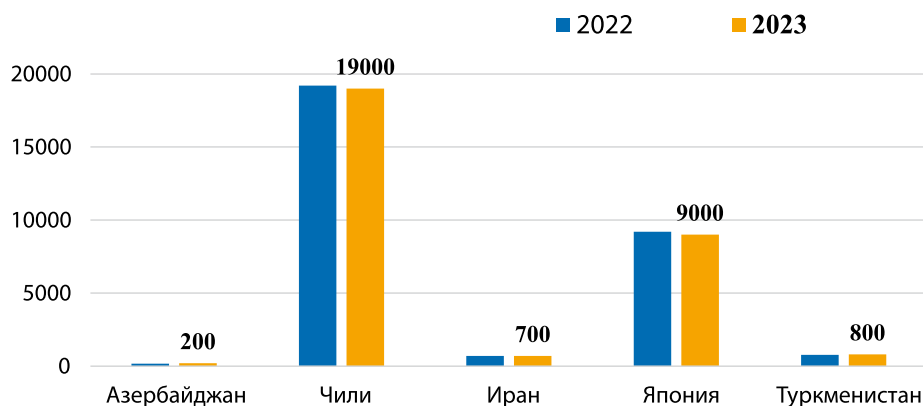


Рис. 1 Страны, экспортирующие йод в 2022 и 2023 г.

Применение йода разнообразно, но в большей степени он используется в фармацевтике.

*Области применения йода:* фармацевтические препараты, косметика; рентгеноконтрастные материалы (*XRCM*); жидкокристаллические дисплеи (*LCD*); пищевые добавки, корма для животных; фторхимикаты, биоциды; нейлон и синтетический каучук; специфические металлы и резина; поляроидное стекло и лампы накаливания.

В космических технологиях йод выступает в качестве рабочего тела ионных двигателей. Наряду с традиционными технологиями (цианидное и аммиачно-тиосульфатное выщелачивание цветных и благородных металлов) применяется йодидное выщелачивание золота [4].

В России, по разным оценкам, потребляется от 800 до 1500 т йода в год [5]. Следует отметить, что в условиях ожидаемого принятия Федерального закона «О профилактике заболеваний, вызванных дефицитом йода» спрос на йодные продукты может значительно увеличиться.

Мировой рынок йода характеризуется ежегодным существенным ростом цен. За двадцать лет с 2002 до 2022 гг. средняя цена поднялась с \$12 до \$41 за 1 кг (рис. 2).

В 2023 г. средняя цена импортируемого в Китай йода составила около \$67 за 1 кг, в США – \$61. Рост стоимости йода определяется в основном увеличением спроса

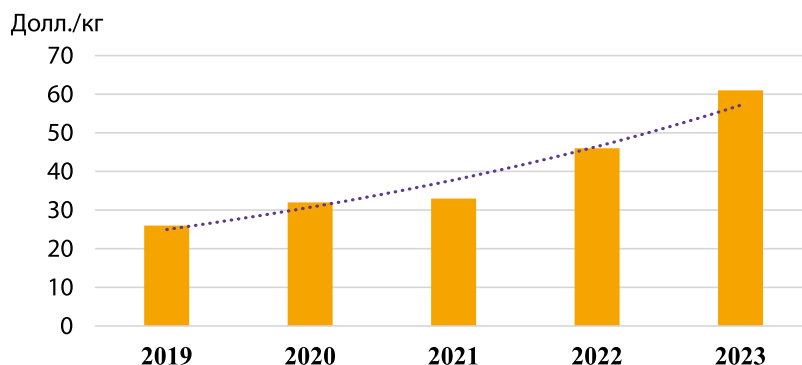


Рис. 2 Динамика цен на йод по данным USGS [3]

со стороны азиатской промышленности и колебанием объема производства на мировом рынке.

Производство йода в России началось в 1915 г. в г. Екатеринославле (ныне г. Днепрпетровск), там получали йод из золы черноморской водоросли филлофоры и за годы первой мировой войны на этом заводе было добыто 200 кг йода. Позднее, в СССР, кристаллический йод стали добывать из подземных вод. Кроме этого, в последние годы йодосодержащие продукты производили из водорослей Белого моря (Архангельский водорослевый комбинат) для лечебных, косметических и других целей, однако в целом после 90-х годов производство йода в России постоянно уменьшалось: Троицкий йодный завод, построенный еще в 1964 году, и на рубеже веков занимавший 90% российского рынка (около 200 т йода в год), с 2007 г. отказался от эксплуатации местного месторождения подземных вод и стал работать на импортном сырье. В 2015 г. у завода была отозвана лицензия на добычу промышленных подземных вод, а в 2019 г. он был признан банкротом.

После вхождения Крыма в состав РФ в России появилось новое предприятие, производящее йодиды – ПАО «НПО Йодобром». В 2022 г., по данным Росстата, в стране было произведено менее 7 тонн йода, очевидно, из привозного сырья.

До 2008 года единственным предприятием, добывающим йод, было АО «Троицкий йодный завод» в Красноярском крае. Оно обанкротилось.

На сегодняшний день около 90% потребляемого в России йода импортируется из других стран.

*Минерально-сырьевая база йода России.* Государственным балансом Российской Федерации запасы промышленных йодных вод на 01.01.2023 составляли 469,7 тыс. м<sup>3</sup>/сут., в том числе категорий А+В+С<sub>1</sub> – 374,8 тыс. м<sup>3</sup>/сут., С<sub>2</sub> – 94,9 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Забалансовые запасы составляют 15,4 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Учитываются 6 месторождений йода, в т.ч. пять объектов йодных вод: Архангельская обл. (Северодвинское месторождение), Астраханская обл. (Леонидовское и Астраханское месторождения), Краснодарский край (Славяно-Троицкое месторождение), Тюменская обл. (Тюменское месторождение) и один объект йодо-бромных вод в Пермском крае (Краснокаменское месторождение) (рис. 3). Содержание йода в этих водах колеблется от 8 до 56 г/м<sup>3</sup>.

При освоении всех утвержденных запасов йодосодержащих вод полученное количество йода не сможет полностью удовлетворить текущие производственные потребности России. При этом в распределенном фонде недр учитываются только два подготавлива-



Рис. 3  
Месторождения  
йода, учитываемые  
балансом РФ на 2023 г.

емых к освоению месторождения йодных вод – Леонидовское в Астраханской области и Северодвинское в Архангельской.

Несмотря на конкуренцию с зарубежными производителями, поставляющими йод в нашу страну, российские недропользователи создают собственное производство. Например, в Архангельской области компания ООО «Русский йод» планирует добыть в 2025 г. первую партию йода на Бобровском участке Северодвинского месторождения. Расчетная производительность завода будет составлять до 120 т йода в год [6].

В ближайшие пять лет планируется производить до 60 т йода марки «Ч». По некоторым данным, авторские запасы Бобровского участка составляют 17 тыс. т йода.

В пределах СЗФО промышленные воды распространены в Северодвинском, Печорском и Московском (северная часть) артезианских бассейнах. Участки скопления промышленных вод приурочены к коллекторам осадочного чехла (глубины до 1000 м), а также переходной зоны между чехлом и фундаментом (глубины до 5000 м).

Авторами рассматривались практически все источники соленых вод, как поверхностные, так и подземные, анализировались исторические факты (солепромыслы) и материалы по нефтегазоносным и опорным скважинам. Гидроминеральное сырье здесь связано с терригенными и карбонатными комплексами девона, карбона и перми (слабоминерализованные йодо-бромные воды), а также с венд-кембрийскими и рифейскими отложениями (рассолы с повышенным содержанием лития, брома и стронция) (табл. 1).

Подземные воды с повышенными содержаниями йода в Тимано-Печерье имеют ограниченное распространение. В девонских отложениях они развиты отдельными небольшими пятнами вдоль поднятий (Печоро-Кожвинский и Колвинский валы, гряда Чернышова) (рис. 4). Йодосодержащие водоносные комплексы каменноугольных и пермских отложений, имеют региональное распространение, ими занята основная часть Больше-сынинской впадины и Денисовского прогиба. Перспективные территории Хорейверской впадины и Колвинского вала (табл. 2).

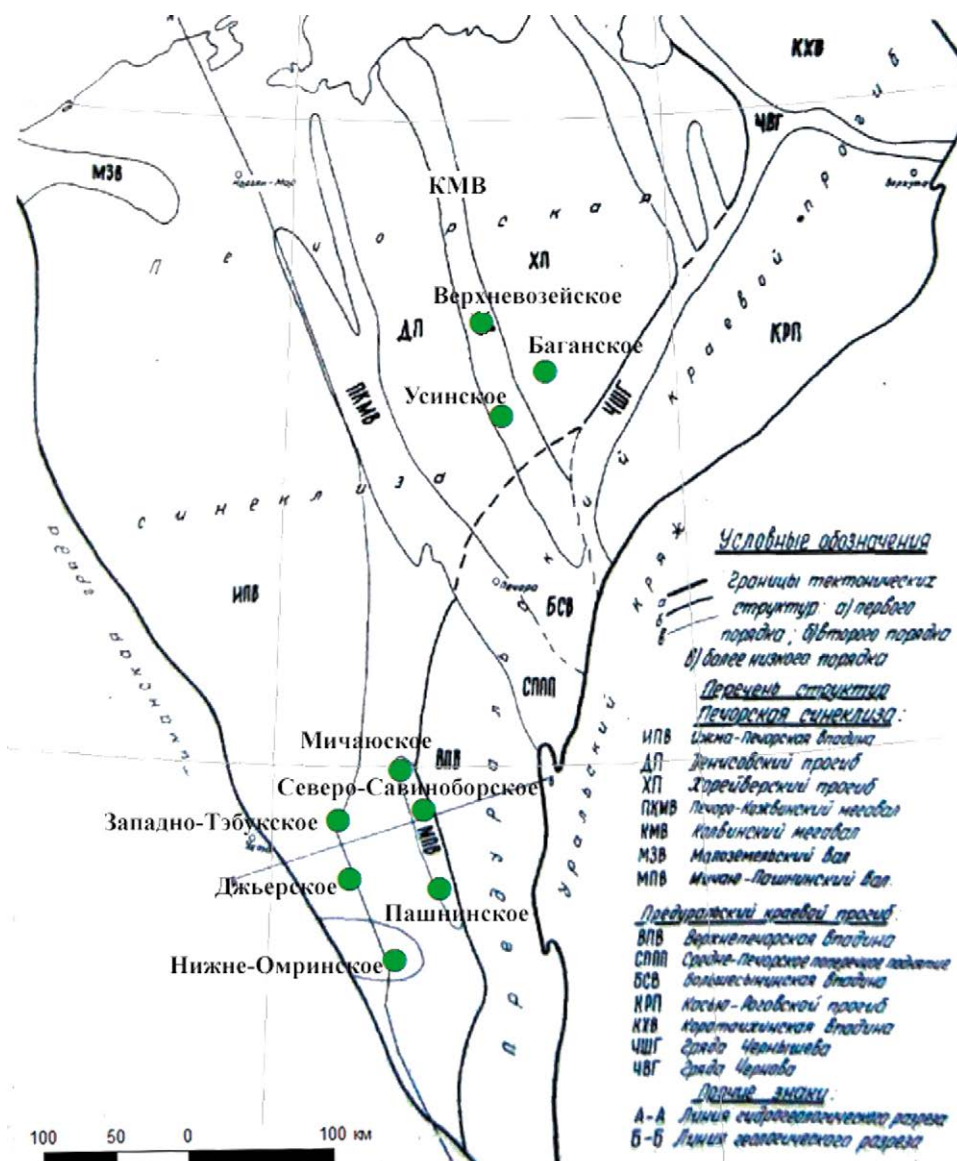


Рис. 4 Схема расположения перспективных гидроминеральных месторождений

Таблица 1. Источники, содержащие йод в Северо-Западном Федеральном округе

| Административная привязка | Состав вод и содержание полезных компонентов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Мурманская обл.           | Пресные и радоновые воды с низкой соленостью [5]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Архангельская область     | Северодвинское месторождение («Русский йод») – I до 25,5 мг/л,<br>Усть-Двинская впадина – I до 18 мг/л,<br>Ненокские источники – Br 65 мг/л,<br>Мартыновский соляной источник – $H_2S$ 0,045 г/л,<br>Лапоминские йодные источники – I от 20,5 мг/л до 42 мг/л,<br>В северной части области межморенные водоносные горизонты: глубина 19 м – I 20,5 мг/л, глубина 88 м – I 42 мг/л [8] |

| Административная привязка | Состав вод и содержание полезных компонентов                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ненецкий автономный округ | Пым-Ва-Шор. Горячие источники – Т до +29°С. Слабосоленые воды. Сероводородные воды с сернистыми отложениями                                                                                                                                               |
| Республика Карелия        | Железистые, радоновые воды – курорт «Марциальные воды». Йодные минеральные воды – пос. Ряймяля. <i>I</i> – от 11,6 до 21,6 мг/л, <i>Br</i> – до 5,8 мг/л [9]                                                                                              |
| Калининградская обл.      | Солоноватые и соленые хлоридные натриевые воды с минерализацией от 1 до 35 г/л. Лечебные грязи                                                                                                                                                            |
| Вологодская обл.          | Талицкие ключи – азот 97,6 %, метан. Велико-Устюгская скважина (мг/л): <i>Sr</i> – до 1240, <i>I</i> – до 60, <i>Br</i> – до 29, водорастворенный азот – до 87%. Тотма – <i>I</i> и <i>Br</i> . Леденгские соляные источники и Мариинская скважина – азот |
| Ленинградская обл.        | Радоновые и железистые воды. Лопухинка – до 400 бк/л радона. Сестрорецк – бром и йод в малых количествах                                                                                                                                                  |
| Новгородская обл.         | Старая Русса – лечебные минеральные воды, содержащие бром, хлор и натрий. Г. Солецы                                                                                                                                                                       |
| Псковская обл.            | Сульфатно-кальциевые, сероводородные, хлоридно-натриевые и йодо-бромистые минеральные воды – <i>I</i> около 5 мг/л. «Голубые озёра» в Невельском районе, берега р. Шелонь                                                                                 |
| Республика Коми           | Сереговский солезавод. Гидрохимические аномалии на йод, бром и литий. Сероводородные воды. Наличие радия-226. Ухта: <i>Br</i> – 127 мг/л, <i>Ba</i> – 27 мг/л. Газифирующие соляные источники                                                             |

Таблица 2. Содержание йода, брома и лития в водоносных комплексах Тимано-Печерской нефтегазоносной провинции [10]

| Возраст                  | Интервал отбора, м | Минерализация, г/л | Содержание, мг/л |           |             |
|--------------------------|--------------------|--------------------|------------------|-----------|-------------|
|                          |                    |                    | <i>I</i>         | <i>Br</i> | <i>Li</i>   |
| Водоносный комплекс О-5  | 1650               | 186,4              | <b>13,9</b>      | 618       | Н.д.        |
|                          | 3370-3591          | 162,8              | <b>10,1</b>      | 581       | Н.д.        |
| Водоносный комплекс D2-3 | 3315-3333          | 101,8              | <b>30,6</b>      | 312       | Н.д.        |
|                          | 3429-3438          | 61,3               | <b>23,2</b>      | 190       | Н.д.        |
|                          | 3637-3672          | 214,9              | <b>35,9</b>      | 639       | Н.д.        |
| Водоносный комплекс С-Р1 | 2050-2090          | 135,1              | <b>18</b>        | 295       | <b>18,8</b> |
|                          | 2514-2482          | 142,2              | <b>23</b>        | 303       | <b>17,5</b> |
|                          | 2533-2600          | 127,5              | <b>20</b>        | 302       | <b>20</b>   |



ГМС с повышенными содержаниями лития широко распространено в каменноугольных и пермских отложениях Денисовской впадины, где гидрохимические аномалии протягиваются узкой полосой с юга на север. Характерно, что на этой территории они занимают ту же площадь, что и стронциеносные рассолы. В разломных зонах происходит перемешивание вышележащих йодных вод с более глубокими литиевыми.

По данным ПГО «Архангельскгеология» (Бабилова А.И. и др., 1986) на структурах Тимано-Печерской провинции, в основном на крыльях валов, отмечаются повышенные содержания лития – до 106 мг/л, а также йода и брома (табл. 3).

В водоносном комплексе карбонатных нижнекаменноугольно-нижнепермских отложений проявлены повышенные пластовые давления и изменчивые гидрогеологические показатели, что свою очередь может говорить о неоднородности коллекторских свойств пород и восходящем движении флюидов в зонах тектонической активности и разрывных нарушений. Следует отметить, что все воды, в которых выявлены повышенные содержания лития, брома, стронция, рубидия и цезия, относятся к хлоридно-кальциевым [12].

По данным [11] было выделено девять перспективных гидроминеральных месторождений: Западно-Тэбукское, Пашнинское, Джьерское, Мичаюское, Северо-Савиноборское,

Таблица 3. Содержание микроэлементов в ГМС на перспективных площадях Тимано-Печерской провинции

| Структура                            | Комплекс / горизонт                                                                         | Возраст     | Площадь / месторождение / скважина                           | J       | Br      | Li     |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------|---------|---------|--------|
|                                      |                                                                                             |             |                                                              | мг/л    |         |        |
| Шапкино-Юрьяхинский вал              | Водоносный комплекс карбонатных нижнекаменноугольно-нижнепермских отложений                 | $C_1-P_1$   | –                                                            | до 55,6 | 158-296 | 45-82  |
| Лайский вал                          |                                                                                             |             | Лаявожское месторождение                                     | 14-30   | 213-293 | 28-38  |
| Колвинский мегавал                   |                                                                                             |             | Северо-Харьгинское, Ярейюское, Южно-Хыльчюское месторождения | 2-35    | 128-320 | 6-106  |
| Хорейверская впадина                 |                                                                                             |             | –                                                            | 3-25    | 184-371 | 13-39  |
| Вал Сорокина                         |                                                                                             |             | –                                                            | от 2    | 60-224  | 9-29   |
| Шапкино-Юрьяхинский вал              | Водоносный комплекс терригенно-карбонатных верхнедевонских – нижнекаменноугольных отложений | $D_3 - C_1$ | Ванейвисская, Южно-Шапкинская                                | 11-71   | 277-322 | н.д.   |
| Лайский вал                          |                                                                                             |             | –                                                            | 19-21   | 343-346 | н.д.   |
| Колвинский мегавал                   |                                                                                             |             | –                                                            | до 19   | 135-453 | 7-33,6 |
| Вал Сорокина                         |                                                                                             |             | –                                                            | до 296  | 93-374  | 26-50  |
| Хорейверская впадина                 | Водоносный комплекс терригенно-карбонатных силурийско-нижнедевонских отложений              | $S-D_1$     | Скважина № 1 Хорейверская                                    | 6,34    | 585     | 22     |
| Варандей-Адзвинская структурная зона |                                                                                             |             | Северо-Серембойская, Серембойская, Нядейюская, Хосырейская   | 8,5-15  | 404-420 | н.д.   |

Нижнеомринское, Усинское, Баганское и Возейское (табл. 4, рис. 4). Разрабатывались промышленные технологии извлечения и переработки попутных вод Нижнеомринского и Верхнеомринского, Вуктыльского и Лаявожского газоконденсатных и др. месторождений.

Как видно из представленного материала, состав минеральных вод Северо-Западного федерального округа разнообразный и представлен углекислыми, железистыми, кремнистыми, борными и радоновыми водами.

Минеральные воды округа используются как лечебно-столовые, лечебные и бальнеологические (воды для наружного применения).

Таблица 4. Содержание брома и йода в гидроминеральном сырье Тимано-Печерской нефтегазоносной провинции

| Площадь, скважина                                                                                       | Интервал<br>опробования,<br>м | Возраст<br>вмещающих<br>толщ | Минерализация, г/л | Содержание, мг/л |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------|------------------|-----------|
|                                                                                                         |                               |                              |                    | Ј                | Br        |
| С. Мылвинская                                                                                           | 1455-1479                     | $D_2$                        | 194-198            | <b>11,4-17,8</b> | 788-809,8 |
| З. Тэбукская                                                                                            | 1953-2079                     | $D_2$                        | До 240             | <b>6,4-15</b>    | 139-982   |
| Пашнинская                                                                                              | 2493-3295                     | $D_2$                        | 128-236            | <b>2,5-49,1</b>  | 288-1260  |
| Харьгинская                                                                                             | 2659-4053                     | $D_2$                        | 124-194            | <b>8,5-31,7</b>  | 306,4-962 |
| Ю. Сенгейская                                                                                           | 1980-2234                     | $S_1$                        | До 191             | <b>25-47</b>     | 424-916   |
| Песчаноозерская                                                                                         | 3620-3691                     | $D_3ps, O$                   | 189                | <b>63,4-67,7</b> | 916-949,7 |
| Хосолтинская                                                                                            | 3860-4000                     | $S-D_1$                      | До 209,9           | <b>15-16,8</b>   | 711-777,9 |
| Макарихинская, 12                                                                                       | 4360-4515                     | $O_{1-2}$                    | 194                | <b>22,4</b>      | 1027,2    |
| Колвинская<br>параметрическая<br>1-П – 7057 м (глубина<br>остановлена в силуре –<br>приток газа и воды) | 6911-6918                     | $S_1$                        | 219                | <b>31,7</b>      | 1113,8    |

#### Таким образом можно сделать следующие выводы:

- внешний и внутренний рынок йода имеет тенденцию роста;
- на сегодняшний день разведанные и оцененные ресурсы йодных вод в России используются очень слабо из-за отсутствия крупных потребителей йода, наличия на мировом рынке более дешевого сырья и невысокой рентабельности освоения ГМС только на йод (без извлечения попутных компонентов);
- полное импортозамещение йода в России возможно только при наличии долгосрочной государственной стратегии в области недропользования.

#### Для решения задачи по импортозамещению йода необходимо проведение следующих мероприятий:

- стимулирование недропользователей со стороны государства;
- поиск потребителей продукции, получаемой из промышленных вод, как на внутреннем, так и на внешнем рынке;
- разработка комплексной и высокорентабельной технологии переработки гидроминерального сырья, обеспечивающей производство более качественной продукции с широкой номенклатурой;

- проведение работ по оценке запасов попутных вод нефтяных и газовых месторождений как дополнительного источника ГМС.

**Актуальность изучения ГСМ в СЗФО определяется следующим:**

- наличием геологических структур, перспективных на выявление ГМС;
- территориальной близостью потенциальных потребителей йода и других попутных продуктов ГСМ;
- выявлением промышленных содержаний йода в ордовикских, силурийских, девонских и каменноугольных отложениях, лития и брома – в пермских, венд-кембрийских и рифейских отложениях [12];
- недостаточной гидрогеологической изученностью;
- перспективами развития инфраструктуры региона.

Фактические данные и проведенное исследование подтверждают наличие ГМС в Северо-Западном федеральном округе. Продолжение исследований и выделение перспективных площадей по ГМС имеет здесь большие перспективы.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1) Бондаренко С.С., Лубенский Л.А., Куликов Г.В. Геолого-экономическая оценка месторождений подземных промышленных вод. М.: Недра, 1988. – 128 с.
- 2) Чумляков К.С., Чумлякова Д.В. Рынок йода в мире и России: современное состояние и тенденции развития // Фундаментальные исследования. 2021. – № 7. <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=43072>.
- 3) U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2024. Iodine <https://doi.org/10.3133/mcs2024>
- 4) Шадрунова И.В., Зелинская Е.В. Перспективные процессы и технологии для переработки техногенного минерального сырья. Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке / Плаксинские чтения-2019. Материалы международной конференции. Иркутск, 2019. – С. 34-37.
- 5) Производство йода в России: на импорт надеяться нельзя, пора восстанавливать собственные заводы». [Электронный ресурс]: [https://www.megaresearch.ru/new\\_reality/proizvodstvo-yoda-v-rossii-na-import-nadeyatsya-nelzya-pora-vosstanavlivat-sobstvennyye-zavody](https://www.megaresearch.ru/new_reality/proizvodstvo-yoda-v-rossii-na-import-nadeyatsya-nelzya-pora-vosstanavlivat-sobstvennyye-zavody).
- 6) Вараксина Д. «Русский йод» в 3 квартале начнет добычу йода в Архангельской области // Ведомости. Северо-запад. [Электронный ресурс]: <https://spb.vedomosti.ru/economics/articles/2024/06/17/1044151-dobichu-ioda?ysclid=m1rz6j8vd4972896109>.
- 7) Виноград Н.А. Комплексное использование подземных минерализованных вод севера Русской платформы. Дисс. ... канд. геол.-минер. наук. СПб., 2000. – 200 с.
- 8) Скробов А.А. Природные минеральные воды Северного края (материалы по минеральным водам Архангельской и Вологодской областей и Коми АССР) / Скробов А.А., Смирнов В.И. [Электронный ресурс]: <https://nebrk.ru/docs/common/RKOMIBIBL0001178913>.
- 9) Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2: Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи / Монография / В.П. Михайлов и др. Отв. ред. В.П. Михайлов, В.Н. Аминов. Петрозаводск, 2006. – 355 с.
- 10) Попов В.М. Гидрогеохимические закономерности распространения и перспективы использования промышленных вод Тимано-Печорской провинции. Дисс. ... канд. геол.-минер. наук. М.: 1979. – 210 с.

- 11) Митюшева Т.П., Амосова О.Е. и др. «Применение факторного анализа при изучении подземных промышленных йодобромных вод Тимано-Североуральского региона» // Вода: химия и экология. — 2013. — №9. — С. 80-88.
- 12) Михеева Е.Д., Кузьменко П.С., Ключарев Д.С. Геолого-генетическая модель, поисковые критерии и признаки месторождений литиеносного гидроминерального сырья // Отечественная геология, № 1/2024. DOI:10.47765/0869-7175-2024-10003 [Электронный ресурс]: [https://www.tsngri.ru/magazine/OG/2024/1\\_24\\_min.pdf](https://www.tsngri.ru/magazine/OG/2024/1_24_min.pdf).

## ПЕТРОГРАФО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ И КАРТИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНО- МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ КАК ОСНОВА ВЫДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗОЛОТО-УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЭЛЬКОНСКОГО ЗОЛОТО-УРАНОВОРУДНОГО УЗЛА)

Молчанов А.В., Белова В.Н., Семенова В.В.,  
ФГБУ «Институт Карпинского», СПб

**Аннотация.** Настоящая статья написана по материалам доклада, прочитанного авторами на Конференции «Актуальные проблемы поисковой геологии» во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н.М. Федоровского 19-21 ноября 2024 г. Рассматриваются результаты исследований петрографо-геохимических особенностей гидротермально-метасоматических образований, развитых в пределах Эльконского золото-урановорудного узла. На основе петрографо-геохимического изучения гидротермально-метасоматических образований в полном объеме их проявлений составлена *Карта прогнозного металлогенического районирования Эльконского золото-урановорудного узла* масштаба 1:50 000, на которой выделены площади, наиболее перспективные для проведения крупномасштабных поисковых работ, включая бурение, на традиционный для региона тип золото-уранового оруденения («эльконский») в региональных зонах разрывных нарушений, претерпевших полихронную гидротермально-метасоматическую проработку. Также намечены площади, где ожидается выявление и относительно нового для региона, золото-порфирового типа оруденения. Первоочередными для постановки крупномасштабных поисковых работ с бурением рекомендуются две площади — «Восточная» и «Шанго», в сумме занимающие 35 км<sup>2</sup>, в пределах которых ожидается выявление объектов с ресурсами  $P_2$ : по урану — более 235 тыс. т; по золоту — до 300 т, включая золото-порфировый геолого-промышленный тип (рябиновый тип).

**Ключевые слова:** металлогения, метасоматиты, геохимия, уран, золото, прогноз, Эльконский горст, Якутия.

**Введение.** Настоящая статья написана по материалам доклада, прочитанного авторами на Конференции «Актуальные проблемы поисковой геологии» во Всероссийском

научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н.М. Федоровского 19-21 ноября 2024 г., в котором представлялись результаты исследований петрографо-геохимических особенностей гидротермально-метасоматических образований, развитых в пределах Эльконского золото-урановорудного узла, выполненных ранее по Договору с ГУ ГПП РС (Я) «Якутскгеология». Исследования осуществлялись на площадях, расположенных за пределами лицензированных участков, южнее зоны «Южная», которые привели к выделению и картированию комплексных золотоурановых аномалий, генетически связанных с низкотемпературными гидротермально-метасоматическими образованиями – гумбеитами, сформированными на этапе мезозойской тектоно-магматической активизации Алданского щита. В результате выполненных работ локализованы площади, заслуживающие постановки детальных поисковых работ, перспективных на выявление комплексных золото-урановорудных месторождений, как традиционных, так и новых для региона типов.

На площади поисковых работ была создана относительно равномерная сеть опорных пунктов наблюдения. Расстояние между профилями составляло 750 м, между точками обязательного наблюдения – 500 м. При необходимости шаг опробования на профилях сгущался до 50-25 м. В процессе работ было задокументировано и опробовано 2134 точки наблюдения.

При проведении петрографо-геохимических исследований были изучены и закартированы гидротермально-метасоматические образования в полном объеме их проявления; составлены карты распределения различных типов рудоносных гидротермально-метасоматических образований; выяснены особенности метасоматической зональности Эльконского золото-урановорудного узла, геохимическая специализация метасоматитов различной фациальной принадлежности.

**Эльконский золото-урановорудный узел** входит в состав Центрально-Алданского рудного района, расположенного в северной части Алданского щита, и совпадает по площади с одноименной горстовой структурой северо-западного простирания протяженностью до 60 км (рис. 1). Урановые месторождения узла открыты в начале 60-х годов и были подвергнуты интенсивным геологоразведочным работам и научным исследованиям специалистами ВИМСа, ВИРГа, ВСЕГЕИ, ГЕОХИ РАН, ИГЕМ РАН, МГРИ и некоторых других организаций. На территории узла выявлено порядка 20 месторождений с общими запасами урана более 340 тыс. т при среднем его содержании [3, 5, 6] в рудах до 0,147% и прогнозными ресурсами до 600 тыс. т урана. Более 75% запасов урана сосредоточено в зоне Южной, являющейся, по сути, гигантской рудоносной структурой протяженностью более 20 км. Месторождения Эльконского золото-урановорудного узла комплексные, с запасами золота по узлу до 180 т, серебра более 2,5 тыс. т и молибдена более 90 тыс. т [4].

Основной геологический фон Эльконского золото-урановорудного узла представлен гнейсами и кристаллическими сланцами архей–раннепротерозойского возраста, метаморфизованными в условиях гранулитовой фации; широко развиты гранитоиды. На западном фланге узла закартированы многочисленные интрузивные тела щелочных и субщелочных пород, сформированные на этапе мезозойской тектоно-магматической активизации. Характерной чертой геологического строения Эльконского рудного узла, играющей существенную роль в его металлогении, является широкое развитие зон региональных разрывных нарушений глубокого заложения и длительного развития, которые контролируют основную массу золото-урановорудных, золоторудных и молибденовых





нием геохронологического возраста интрузивных тел магматических пород раннепротерозойского и мезозойского этапов развития региона.

При изучении прозрачно-полированных шлифов осуществлялась: диагностика исходной породы; определение общего списка эпигенетических минералов; описание форм выделения конкретных минералов; оценка размерности кристаллических индивидов эпигенетических минералов и их агрегатов ( $<0,01$ ;  $0,01-0,1$ ;  $0,1-1,0$ ;  $>1,0$  мм). Выяснялись возрастные соотношения эпигенетических минералов — как друг с другом, так и с минералами исходной породы. По сумме структурно-вещественных признаков выделялась одна или несколько ассоциаций эпигенетических минералов, а также проводился подсчет процентного содержания — как отдельных минералов, так и всей ассоциации в целом в 9-тибалльной градации ( $<5$ ,  $5-10$ ,  $10-15$ ,  $15-20$ ,  $20-30$ ,  $30-40$ ,  $40-50$ ,  $50-80$ ,  $>80$  %).

В ходе картирования гидротермально-метасоматических образований в масштабе 1:50 000 в полном объеме их проявления, то есть с учетом внешних зон слабых изменений, на территории Эльконского рудного узла установлено 28 эпигенетических минералов (табл. 1).

Отмеченные минералы, проявленные в коренных породах Эльконского рудного узла в самых различных сочетаниях друг с другом, образуют устойчивые гидротермально-метасоматические ассоциации (парагенезисы). Всего в процессе петрографических работ по структурно-вещественным характеристикам и термодинамическим параметрам выделено (табл. 2) и детально изучено пять таких гидротермально-метасоматических ассоциаций эпигенетических минералов (A1, A2, A3, A4 и A5).

**Геохимические исследования гидротермально-метасоматических образований.** Для определения геохимических особенностей гидротермально-метасоматических образований проанализировано 2134 штучных пробы и столько же прозрачно-полированных шлифов. Из всех проб на основе петрографических исследований составлены два массива — неизменные (исходные) породы и гидротермально-метасоматические образования в разной степени изменения. Для понимания характера и степени изменения содержаний петрогенных окислов и рудогенных химических элементов при развитии разноформационных типов гидротермально-метасоматических процессов в табл. 3 и 4, в качестве примера, приведены данные, полученные из выборок с различной степенью гумбеитизации исходных пород Эльконского рудного узла.

Полученный в результате проведенного комплекса лабораторных исследований массив данных по значениям ключевых петрографических признаков делился на две части: «рабочую», в которую попали все объекты, отвечающие минимально гидротермально-метасоматически измененным породам, и «остаток» — с объектами, не удовлетворяющими данному требованию. За величину порога, по которому осуществлялся «отсев» объектов по ключевым параметрам, было принято 20% новообразований. Это позволило выделить из оперативного файла объемом 2134 объекта совокупность в 513 объектов, удовлетворяющих данному требованию. Для полученной выборки рассчитывались основные статистические параметры, строились гистограммы, осуществлялась проверка гипотез закона распределения элементов и т. д. Далее путем деления исходных значений геохимических признаков базы данных на соответствующие значения фона осуществлялось нормирование всего блока исходных данных по фоновым значениям признаков. Эта операция позволила в значительной степени «заглушить» геохимическую специализацию исходных пород и работать с новым нормированным файлом как будто бы в «однородной геологической среде».

Таблица 1. Распространенность вторичных минералов  
в гидротермально-метасоматически измененных породах

| №<br>п/п | Минерал                        | Индекс<br>минерала | Гидротермально-метасоматическая ассоциация |     |     |    |     | Сумма |
|----------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|-----|-----|----|-----|-------|
|          |                                |                    | A1                                         | A2  | A3  | A4 | A5  |       |
| 1        | Гидросерицит                   | <i>Hser</i>        | 258                                        | 696 | 0   | 0  | 0   | 954   |
| 2        | Серицит                        | <i>Ser</i>         | 463                                        | 420 | 317 | 0  | 185 | 1385  |
| 3        | Мусковит                       | <i>Ms (Ser)</i>    | 94                                         | 0   | 0   | 0  | 0   | 94    |
| 4        | Кварц                          | <i>Qtz</i>         | 637                                        | 665 | 285 | 9  | 734 | 2330  |
| 5        | Калишпат (адуляр)              | <i>Kfs (Ad)</i>    | 610                                        | 0   | 0   | 0  | 0   | 610   |
| 6        | Калишпат (ортоклаз, микроклин) | <i>Kfs (Mi)</i>    | 0                                          | 0   | 0   | 0  | 877 | 877   |
| 7        | Альбит                         | <i>Ab</i>          | 98                                         | 0   | 75  | 20 | 744 | 937   |
| 8        | Анкерит (кальцит)              | <i>Ank</i>         | 407                                        | 377 | 142 | 11 | 85  | 1022  |
| 9        | Барит                          | <i>Ba</i>          | 24                                         | 0   | 2   | 0  | 0   | 26    |
| 10       | Хлорит                         | <i>Chl</i>         | 88                                         | 512 | 282 | 0  | 37  | 919   |
| 11       | Биотит (зеленый)               | <i>Bt</i>          | 25                                         | 25  | 64  | 0  | 0   | 114   |
| 12       | Флогопит                       | <i>Plg</i>         | 0                                          | 0   | 0   | 15 | 143 | 158   |
| 13       | Эпидот                         | <i>Ep</i>          | 0                                          | 96  | 323 | 5  | 0   | 424   |
| 14       | Пумпеллиит                     | <i>Pump</i>        | 0                                          | 14  | 37  | 0  | 0   | 51    |
| 15       | Пренит                         | <i>Preh</i>        | 0                                          | 11  | 6   | 0  | 0   | 17    |
| 16       | Актинолит                      | <i>Amf (Act)</i>   | 0                                          | 0   | 66  | 19 | 106 | 191   |
| 17       | Рибекит*                       | <i>Rib</i>         | 0                                          | 0   | 69  | 0  | 0   | 69    |
| 18       | Эгирин                         | <i>Eg</i>          | 0                                          | 0   | 30  | 15 | 283 | 328   |
| 19       | Пироксен                       | <i>Px</i>          | 0                                          | 0   | 0   | 10 | 0   | 10    |
| 20       | Скаполит                       | <i>Skp</i>         | 0                                          | 0   | 0   | 2  | 0   | 2     |
| 21       | Гранат                         | <i>Grt</i>         | 0                                          | 0   | 0   | 15 | 14  | 29    |
| 22       | Ярозит                         | <i>Jar</i>         | 199                                        | 0   | 0   | 0  | 0   | 199   |
| 23       | Флюорит                        | <i>Fl</i>          | 48                                         | 0   | 0   | 0  | 17  | 65    |
| 24       | Гематит-гетит                  | <i>Hm</i>          | 580                                        | 592 | 0   | 0  | 0   | 1172  |
| 25       | Апатит                         | <i>Ap</i>          | 24                                         | 7   | 18  | 4  | 16  | 69    |
| 26       | Рутил                          | <i>Rut</i>         | 52                                         | 0   | 0   | 0  | 23  | 75    |
| 27       | Сфен-лейкоксен                 | <i>Sph</i>         | 0                                          | 43  | 118 | 15 | 77  | 253   |
| 28       | Рудные минералы                | <i>Ores</i>        | 107                                        | 69  | 243 | 7  | 216 | 642   |

Примечание: Распространенность приводится в виде количества случаев обнаружения вторичного минерала в той или иной гидротермально-метасоматической ассоциации при микроскопическом изучении шлифов.

Таблица 2. Распространенность гидротермально-метасоматических ассоциаций и фаций

| ГМ-ассоциация |                | Индекс ГМ-фаций | Состав ГМ-фаций                                | Распространенность |               |
|---------------|----------------|-----------------|------------------------------------------------|--------------------|---------------|
|               |                |                 |                                                | ГМ-фаций           | ГМ-ассоциаций |
| A1            | Гумбеиты       | G1              | <i>kfs(ad)+ank+qtz+/-hm, fl, hser, ser, mi</i> | 351 (17%)          | 729 (35%)     |
|               |                | G2              | <i>ab+chl</i>                                  | 28 (1%)            |               |
|               |                | G3              | <i>kfs+ser(ms)+ank, fl, chl, ba, mi, ores</i>  | 255 (12%)          |               |
|               |                | G4              | <i>ab+qtz+ms(ser)+ank+/-fl, ba</i>             | 95 (5%)            |               |
| A2            | Березиты       | B1              | <i>qtz+ser(ms)+/-hm, cc</i>                    | 194 (9%)           | 791 (38%)     |
|               |                | B2              | <i>qtz+chl+ank(cc)+ser, bt°</i>                | 496 (24%)          |               |
|               |                | B3              | <i>chl+qtz+ank(cc)+ep*, prh</i>                | 101 (5%)           |               |
| A3            | Пропилиты      | P1              | <i>ep+chl+cc+qtz+/-ab, ser</i>                 | 204 (10%)          | 357 (17%)     |
|               |                | P2              | <i>act+ep+chl+cc+qtz+/-ab, ser, trm, talk</i>  | 73 (4%)            |               |
|               |                | P3              | <i>rib+ep+bt°+/-cc, ser, chl</i>               | 80 (4%)            |               |
| A4            | Скарны         | S1              | <i>px+amf+qtz</i>                              | 7 (0.3%)           | 26 (1%)       |
|               |                | S2              | <i>grt+px+skp+/-phl, eg</i>                    | 19 (1%)            |               |
| A5            | Фельдшпатолиты | F1              | <i>qtz+ab(kfs)+/-fl</i>                        | 59 (3%)            | 1161 (56%)    |
|               |                | F2              | <i>qtz+kfs(ab)+/-fl</i>                        | 608 (29%)          |               |
|               |                | F3              | <i>kfs(ab)+bt(phl)+eg</i>                      | 367 (18%)          |               |
|               |                | F4              | <i>eg+kfs(ab)+bt(phl)+hm+/-qtz</i>             | 127 (6%)           |               |

Примечание: Распространенность приводится в виде количества случаев наблюдения гидротермально-метасоматических ассоциаций (ГМ-ассоциации) или гидротермально-метасоматических фаций (ГМ-фаций) при микроскопическом изучении прозрачно-полированных шлифов (в скобках даны значения распространенности в процентах от общего количества изученных шлифов – 2071 шт.).

Индексы минералов и их названия отражены в таблице 1.

Таблица 3. Геохимические особенности гумбеитового гидротермально-метасоматического изменения (фации G1 и G2) разных типов исходных пород Эльконского рудного узла

| Окислы, малые элементы         | Протерозойский гранитоидный комплекс |       |       |        | Протерозойская Федоровская серия |       |       |        |
|--------------------------------|--------------------------------------|-------|-------|--------|----------------------------------|-------|-------|--------|
|                                | фон                                  | I-III | IV-VI | VII-IX | фон                              | I-III | IV-VI | VII-IX |
| SiO <sub>2</sub>               | 74,09                                | 69,90 | 77,95 | 75,41  | 62,85                            |       | 74,20 | 67,50  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13,65                                | 14,10 | 10,52 | 9,16   | 16,19                            |       | 10,71 | 10,70  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,20                                 | 0,40  | 0,24  | 1,07   | 0,76                             |       | 0,83  | 1,96   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,06                                 | 3,00  | 1,92  | 3,74   | 2,94                             |       | 4,11  | 7,01   |
| FeO                            | 0,47                                 | 0,54  | 1,32  | 2,84   | 2,26                             |       | 0,25  | 7,16   |
| MnO                            | 0,02                                 | 0,03  | 0,02  | 0,03   | 0,06                             |       | 0,02  | 0,02   |
| MgO                            | 0,24                                 | 0,03  | 0,03  | 0,20   | 2,05                             |       | 0,03  | 0,03   |
| CaO                            | 1,57                                 | 0,63  | 0,24  | 0,56   | 4,58                             |       | 0,65  | 0,34   |

| Окислы,<br>малые<br>элементы         | Протерозойский гранитоидный комплекс |               |               |               | Протерозойская Федоровская серия |               |               |               |
|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                                      | фон                                  | I-III         | IV-VI         | VII-IX        | фон                              | I-III         | IV-VI         | VII-IX        |
| Na <sub>2</sub> O                    | 3,15                                 | 1,72          | 0,98          | 0,30          | 4,01                             |               | 0,85          | 0,22          |
| K <sub>2</sub> O                     | 4,99                                 | 7,99          | 6,99          | 6,93          | 3,12                             |               | 6,51          | 8,47          |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>        | 0,05                                 | 0,14          | 0,07          | 0,36          | 0,27                             |               | 0,30          | 0,96          |
| H <sub>2</sub> O,<br>CO <sub>2</sub> | 0,41                                 | 1,36          | 1,03          | 1,97          | 0,52                             |               | 1,58          | 2,48          |
| <b>Au</b>                            | <b>0,0024</b>                        | <b>0,0422</b> | <b>0,2501</b> | <b>0,5132</b> | <b>0,0020</b>                    | <b>0,0889</b> | <b>0,3408</b> | <b>0,6253</b> |
| <b>Ag</b>                            | <b>0,048</b>                         | <b>0,590</b>  | <b>4,697</b>  | <b>7,772</b>  | <b>0,037</b>                     | <b>1,195</b>  | <b>2,920</b>  | <b>5,586</b>  |
| <b>Cu</b>                            | <b>30</b>                            | <b>36</b>     | <b>52</b>     | <b>64</b>     | <b>32</b>                        | <b>47</b>     | <b>68</b>     | <b>479</b>    |
| Pb                                   | 7,4                                  | 7,6           | 7,3           | 7,0           | 6,6                              | 6,1           | 8,2           | 10,7          |
| Zn                                   | 14                                   | 15            | 19            | 19            | 22                               | 24            | 23            | 29            |
| Bi                                   | 0,7                                  | 0,6           | 0,6           | 0,6           | 0,6                              | 0,6           | 0,5           | 0,5           |
| Hg                                   | 0,011                                | 0,041         | 0,120         | 0,225         | 0,011                            | 0,109         | 0,173         | 0,205         |
| Sb                                   | 0,2                                  | 0,9           | 14,3          | 8,8           | 0,1                              | 2,1           | 6,3           | 14,0          |
| <b>As</b>                            | <b>2,7</b>                           | <b>26,6</b>   | <b>121,5</b>  | <b>230,3</b>  | <b>2,9</b>                       | <b>68,4</b>   | <b>134,5</b>  | <b>350,6</b>  |
| Ge                                   | 0,9                                  | 1,0           | 1,0           | 1,0           | 1,0                              | 1,1           | 1,2           | 1,3           |
| Ga                                   | 20                                   | 23            | 20            | 18            | 20                               | 26            | 24            | 28            |
| Rb                                   | 127                                  | 131           | 123           | 111           | 72                               | 98            | 126           | 115           |
| Sr                                   | 337                                  | 428           | 301           | 240           | 460                              | 466           | 397           | 344           |
| Ba                                   | 423                                  | 460           | 405           | 297           | 378                              | 316           | 367           | 1171          |
| Zr                                   | 113                                  | 143           | 145           | 116           | 162                              | 172           | 163           | 130           |
| Nb                                   | 4,6                                  | 7,8           | 20,7          | 46,5          | 9,5                              | 12,6          | 32,1          | 43,9          |
| Y                                    | 4                                    | 7             | 9             | 14            | 12                               | 11            | 20            | 31            |
| Yb                                   | 1,6                                  | 1,7           | 1,8           | 1,8           | 1,6                              | 1,5           | 2,5           | 2,6           |
| La                                   | 32                                   | 58            | 54            | 55            | 34                               | 55            | 83            | 60            |
| Ce                                   | 77                                   | 102           | 122           | 99            | 80                               | 93            | 168           | 133           |
| Th                                   | 7,6                                  | 16,0          | 15,5          | 23,9          | 4,2                              | 10,9          | 50,5          | 44,0          |
| <b>U</b>                             | <b>1,6</b>                           | <b>5,1</b>    | <b>333,6</b>  | <b>850,6</b>  | <b>1,1</b>                       | <b>12,8</b>   | <b>96,6</b>   | <b>377,1</b>  |
| Be                                   | 0,8                                  | 0,9           | 0,8           | 0,9           | 1,1                              | 0,8           | 1,3           | 0,6           |
| Li                                   | 11                                   | 15            | 14            | 14            | 13                               | 14            | 14            | 11            |
| W                                    | 1,9                                  | 3,7           | 7,6           | 21,7          | 1,8                              | 4,3           | 7,7           | 6,8           |
| Mo                                   | 3,1                                  | 3,4           | 6,5           | 4,7           | 2,7                              | 3,2           | 3,9           | 5,5           |
| Sn                                   | 1,5                                  | 1,5           | 2,4           | 2,5           | 2,3                              | 2,2           | 2,6           | 2,8           |
| B                                    | 17                                   | 23            | 29            | 28            | 18                               | 28            | 35            | 30            |
| P                                    | 1100                                 | 675           | 756           | 1183          | 1691                             | 826           | 793           | 2201          |
| Mn                                   | 227                                  | 194           | 226           | 197           | 528                              | 435           | 576           | 177           |
| <b>Ti</b>                            | <b>2747</b>                          | <b>2570</b>   | <b>3536</b>   | <b>5252</b>   | <b>4905</b>                      | <b>3841</b>   | <b>5463</b>   | <b>4967</b>   |
| <b>V</b>                             | <b>28</b>                            | <b>74</b>     | <b>191</b>    | <b>340</b>    | <b>52</b>                        | <b>235</b>    | <b>225</b>    | <b>464</b>    |
| Sc                                   | 5,7                                  | 7,5           | 8,2           | 8,8           | 9,1                              | 8,1           | 11,0          | 9,4           |
| Cr                                   | 34,9                                 | 48,7          | 57,3          | 98,1          | 44,0                             | 42,4          | 49,6          | 58,6          |
| Co                                   | 5,5                                  | 6,6           | 7,1           | 7,3           | 10,0                             | 10,4          | 11,4          | 7,7           |
| Ni                                   | 6,8                                  | 9,8           | 9,4           | 9,9           | 12,8                             | 9,8           | 12,1          | 8,9           |

| Окислы,<br>малые<br>элементы | Протерозойский гранитоидный комплекс |       |       |        | Протерозойская Федоровская серия |       |       |        |
|------------------------------|--------------------------------------|-------|-------|--------|----------------------------------|-------|-------|--------|
|                              | фон                                  | I-III | IV-VI | VII-IX | фон                              | I-III | IV-VI | VII-IX |
| Кол-во проб                  | 591                                  | 30    | 82    | 83     | 328                              | 16    | 25    | 7      |
| Кол-во силикат.<br>анализов  | 11                                   | 1     | 6     | 16     | 13                               |       | 2     | 1      |

Примечание: Содержание петрогенных элементов приведены в %, содержание остальных элементов в ppm.

Аналитические исследования проводились в лаборатории ЦАЛ ФГБУ «ВСЕГЕИ»: для петрогенных элементов методом рентгеноспектрального флуоресцентного (силикатного) метода (XRF), остальных элементов – методом индуктивно-связанной плазмы и масс-спектрометрии (ISPM).

I–IX степень ГМ-изменения породы: I–III – слабая-умеренная (< 15% новообразований), IV–VI – умеренная-сильная (15–50% новообразований), VII–IX – интенсивная-полная (> 50% новообразований), IX – полная (> 80%)

Таблица 4. Геохимические особенности гумбеитового гидротермально-метасоматического изменения (фации G3 и G4) разных типов исходных пород Эльконского рудного узла

| Окислы,<br>малые<br>элементы         | Мезозойские интрузивные<br>и дайковые комплексы |               |               |               | Рифей-палеозойский<br>плитный комплекс |               |               |               | Протерозойские гранитоидные<br>комплексы |               |               |               | Протерозойская<br>Федоровская серия |               |               |               |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------------------|---------------|---------------|---------------|------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                                      | фон                                             | I-III         | IV-VI         | VII-IX        |                                        | I-III         | IV-VI         | VII-IX        | фон                                      | I-III         | IV-VI         | VII-IX        | фон                                 | I-III         | IV-VI         | VII-IX        |
| SiO <sub>2</sub>                     | 62,67                                           | 63,48         | 61,53         | 57,19         |                                        |               | 88,70         | 76,50         | 74,09                                    |               | 74,70         | 85,75         | 62,85                               |               |               |               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 16,36                                           | 16,53         | 17,62         | 17,73         |                                        |               | 4,60          | 0,03          | 13,65                                    |               | 12,75         | 5,24          | 16,19                               |               |               |               |
| TiO <sub>2</sub>                     | 0,46                                            | 0,41          | 0,46          | 0,23          |                                        |               | 0,63          | 0,01          | 0,20                                     |               | 0,46          | 1,01          | 0,76                                |               |               |               |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 3,68                                            | 3,28          | 3,68          | 4,52          |                                        |               | 1,24          | 5,14          | 1,06                                     |               | 1,53          | 1,77          | 2,94                                |               |               |               |
| FeO                                  | 1,04                                            | 0,69          | 1,27          | 0,84          |                                        |               | 0,15          | 0,15          | 0,47                                     |               | 0,15          | 0,21          | 2,26                                |               |               |               |
| MnO                                  | 0,09                                            | 0,11          | 0,09          | 0,13          |                                        |               | 0,10          | 0,03          | 0,02                                     |               | 0,03          | 0,03          | 0,06                                |               |               |               |
| MgO                                  | 0,66                                            | 0,29          | 0,58          | 0,78          |                                        |               | 0,03          | 0,03          | 0,24                                     |               | 0,03          | 0,03          | 2,05                                |               |               |               |
| CaO                                  | 1,68                                            | 1,25          | 1,58          | 1,66          |                                        |               | 0,12          | 14,70         | 1,57                                     |               | 0,07          | 0,17          | 4,58                                |               |               |               |
| Na <sub>2</sub> O                    | 3,67                                            | 3,23          | 2,42          | 0,36          |                                        |               | 0,37          | 0,30          | 3,15                                     |               | 1,30          | 0,39          | 4,01                                |               |               |               |
| K <sub>2</sub> O                     | 8,62                                            | 9,68          | 9,08          | 11,17         |                                        |               | 3,73          | 0,18          | 4,99                                     |               | 8,50          | 3,91          | 3,12                                |               |               |               |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>        | 0,13                                            | 0,10          | 0,16          | 0,04          |                                        |               | 0,05          | 0,30          | 0,05                                     |               | 0,03          | 0,12          | 0,27                                |               |               |               |
| H <sub>2</sub> O,<br>CO <sub>2</sub> | 0,70                                            | 0,59          | 1,66          | 2,49          |                                        |               | 0,47          | 2,39          | 0,41                                     |               | 0,66          | 1,03          | 0,52                                |               |               |               |
| Au                                   | <b>0,0019</b>                                   | <b>0,0033</b> | <b>0,0685</b> | <b>5,0760</b> | <b>0,0069</b>                          | <b>0,0136</b> | <b>0,0550</b> | <b>0,0040</b> | <b>0,0024</b>                            | <b>0,0052</b> | <b>0,0791</b> | <b>0,2432</b> | <b>0,0020</b>                       | <b>0,0048</b> | <b>0,0288</b> | <b>0,1220</b> |
| Ag                                   | <b>0,070</b>                                    | <b>0,193</b>  | <b>0,771</b>  | <b>11,628</b> | <b>0,269</b>                           | <b>0,383</b>  | <b>2,467</b>  | <b>0,500</b>  | <b>0,048</b>                             | <b>0,193</b>  | <b>0,702</b>  | <b>9,056</b>  | <b>0,037</b>                        | <b>0,133</b>  | <b>0,480</b>  | <b>6,840</b>  |
| Cu                                   | 34                                              | 111           | 81            | 942           | 12                                     | 9             | 303           | 25            | 30                                       | 47            | 67            | 244           | 32                                  | 106           | 67            | 98            |
| Pb                                   | 30,9                                            | 68,6          | 110,0         | 166,5         | 9,0                                    | 5,0           | 23,7          | 52,6          | 7,4                                      | 24,6          | 50,3          | 234,2         | 6,6                                 | 20,1          | 58,5          | 192,8         |
| Zn                                   | 27                                              | 37            | 54            | 30            | 8                                      | 8             | 27            | 100           | 14                                       | 16            | 22            | 38            | 22                                  | 45            | 40            | 42            |
| Bi                                   | 0,9                                             | 1,0           | 1,2           | 2,4           | 0,8                                    | 0,6           | 0,7           | 0,5           | 0,7                                      | 1,1           | 1,2           | 1,5           | 0,6                                 | 1,1           | 0,9           | 1,3           |
| Hg                                   | 0,009                                           | 0,011         | 0,026         | 0,039         | 0,019                                  | 0,022         | 0,091         | 0,190         | 0,011                                    | 0,010         | 0,031         | 0,435         | 0,011                               | 0,010         | 0,015         | 0,055         |
| Sb                                   | 0,3                                             | 0,4           | 1,4           | 2,3           | 0,3                                    | 0,4           | 2,7           | 5,6           | 0,2                                      | 0,5           | 1,0           | 12,5          | 0,1                                 | 0,3           | 1,1           | 25,2          |
| As                                   | <b>4,2</b>                                      | <b>7,9</b>    | <b>21,9</b>   | <b>11,2</b>   | <b>3,5</b>                             | <b>4,1</b>    | <b>23,7</b>   | <b>91,4</b>   | <b>2,7</b>                               | <b>4,6</b>    | <b>12,2</b>   | <b>56,2</b>   | <b>2,9</b>                          | <b>4,3</b>    | <b>44,6</b>   | <b>45,7</b>   |
| Ge                                   | 1,1                                             | 1,2           | 1,3           | 1,6           | 0,7                                    | 0,8           | 1,3           | 0,5           | 0,9                                      | 1,0           | 1,1           | 1,8           | 1,0                                 | 1,0           | 1,3           | 1,3           |
| Ga                                   | 27                                              | 28            | 32            | 47            | 3                                      | 4             | 4             | 1             | 20                                       | 20            | 24            | 23            | 20                                  | 19            | 26            | 28            |
| Rb                                   | 163                                             | 191           | 215           | 220           | 10                                     | 7             | 62            | 1             | 127                                      | 182           | 195           | 149           | 72                                  | 170           | 162           | 151           |
| Sr                                   | 546                                             | 686           | 680           | 2179          | 127                                    | 158           | 401           | 239           | 337                                      | 173           | 220           | 250           | 460                                 | 274           | 361           | 232           |
| Ba                                   | 541                                             | 949           | 1221          | 2314          | 242                                    | 799           | 400           | 1500          | 423                                      | 645           | 395           | 1840          | 378                                 | 521           | 583           | 960           |
| Zr                                   | 170                                             | 227           | 284           | 1493          | 14                                     | 15            | 37            | 68            | 113                                      | 244           | 213           | 156           | 162                                 | 197           | 164           | 134           |

Результаты геохимических исследований позволили установить распространение на территории Эльконского золото-урановорудного узла ореолы надфоновых содержаний рудных элементов. *На первом этапе* были составлены карты изоконцентраций, отображающие в виде изолиний (в единицах фона) структуру распределения геохимических признаков по исследованной площади района работ. Затем (*второй этап*), на основе использования стандартной программы факторного анализа (метод главных компонент) осуществлялась операция по выявлению тонкой структуры корреляционных связей между геохимическими признаками по всей сумме объектов, учтенных в базе данных (общая задача факторного анализа). С этой целью использовался файл нормированных признаков как наиболее «свободный» от геохимической специализации исходных пород.

Анализ диаграмм показал, что геохимические особенности гидротермально-метасоматически-измененных пород Эльконского рудного узла определяются двумя ведущими ассоциациями элементов:  $Au \cdot Ag \cdot Cu \cdot Mo \cdot Bi \cdot Pb$  и  $Au \cdot Ag \cdot As \cdot Sb \cdot Hg \cdot U$ . Эти ассоциации были взяты за основу и по ним для каждого объекта матрицы базы данных рассчитывались среднегеометрические содержания<sup>1</sup>.

*На третьем этапе* строились карты-изолиний – карты распределения мультипликативных геохимических параметров для площади района работ. Итоговые результаты были вынесены на карту прогнозного районирования Эльконского рудного узла (см. рис. 6, 7).

**Работы по составлению карт и схем гидротермально-метасоматической зональности** включали два вида операций: а) кодирование и ввод петрографических данных в память компьютера и б) картосоставительские работы (рис. 2, 3).

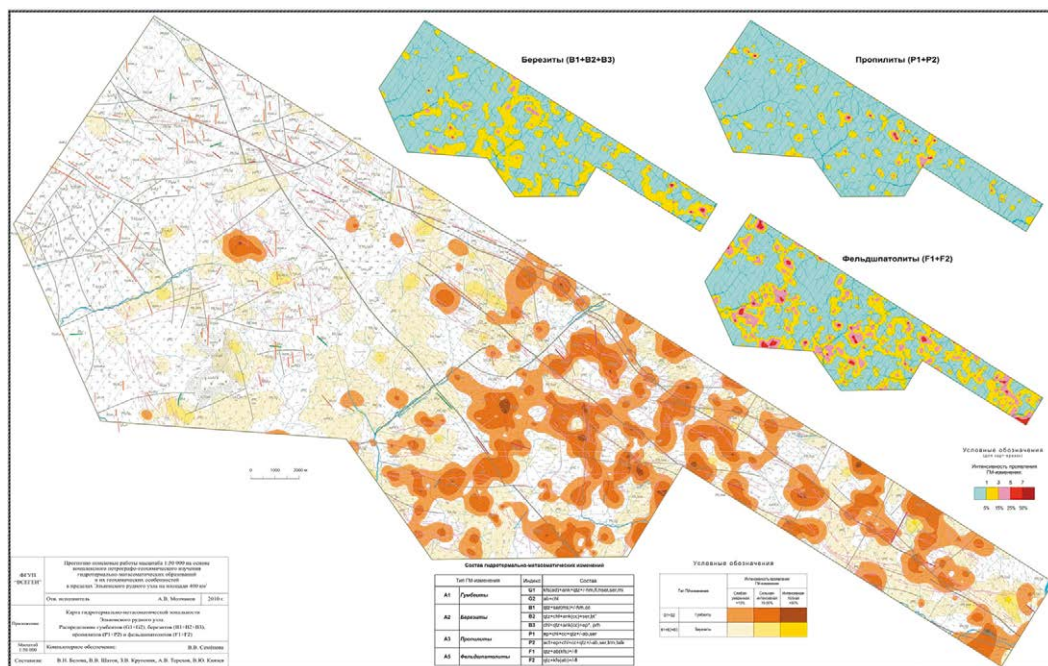


Рис. 2. Карта гидротермально-метасоматической зональности Эльконского рудного узла. Распределение гумбеитов (G1+G2), березитов (B1+B2+B3), фельдшпатолитов (F1+F2)

<sup>1</sup> Выбор в пользу среднего геометрического сделан не случайно, так как его величина в наименьшей степени зависит от аномальных «выбросов» одного из элементов, входящих в ассоциацию.



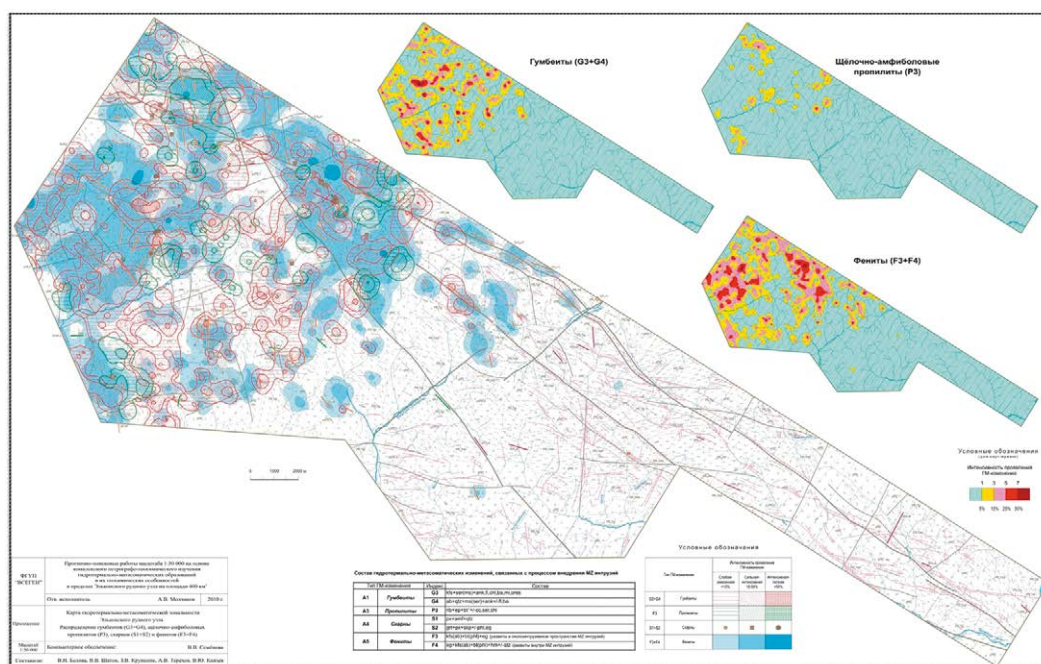


Рис. 3. Карта гидротермально-метасоматической зональности Эльконского рудного узла. Распределение гумбеитов (G3+G4), щелочно-амфиболовых пропилитов (P3), скарнов (S1+S2) и фенитов (F3+F4)

Для ввода информации о петрографических признаках в память компьютера была разработана специальная система кодирования исходных данных. Эта система включала в себя индексацию каждого вещественного признака трехзначным номером, первые две цифры которого соответствовали коду минерала или ассоциации минералов, а третья цифра фиксировала изменчивость самого признака в принятой 10-тибалльной градации: **0** — 0%, **1** — (1-5%), **2** — (5-10%), **3** — (10-15%), **4** — (15-20%), **5** — (20-30%), **6** — (30-40%), **7** — (40-50%), **8** — (50-80%), **9** — (>80%). Кроме того, специально кодировались название исходной породы и ее возраст. Для каждого пункта опорной сети наблюдения рассчитывались координаты X и Y в мм.

В результате в память компьютера был введен массив исходных петрографических данных объемом 2134 объекта на 54 признака.

В организационном отношении эти работы состоят из **трех этапов**: на первом этапе составляются карты изоконцентраций, отображающие в виде изолиний (в единицах фона) структуру распределения геохимических признаков по площади работ; на втором этапе на основе использования стандартной программы факторного анализа (метод главных компонент) **осуществлялась операция по выявлению корреляционных связей** между геохимическими признаками по всей сумме объектов, учтенных в базе данных (общая задача факторного анализа). **С этой целью используется файл нормированных признаков как наиболее «свободный» от геохимической специализации исходных пород**; на третьем этапе строятся карты-изолиний — карты распределения мультипликативных геохимических параметров.

Выделенные на картах изолиний зоны распространения гумбеитовых (G1, G2, G3, G4), березитовых (B1, B2, B3), пропилитовых (P1, P2, P3), скарновых (S1, S2) и фельдшпатолитовых (F1, F2, F3, F4) фаций представляют собой случайные сечения эрозионной поверхностью объемных тел, выполненных в подавляющем большинстве случаев слабо, умеренно

и сильно проявленными минеральными новообразованиями. В общем случае площадные параметры отдельных зон гумбеитов, как наиболее благоприятных для выявления золотого и уранового оруденения, измеряются многими сотнями м<sup>2</sup> и первыми км<sup>2</sup>.

*В юго-западной части Эльконского рудного узла в местах пересечения разнонаправленных рудоносных структур, ореолы средне- и сильнопроявленных минеральных новообразований слагают в общей сложности площадь более десятка км<sup>2</sup>, имеющую форму подковы. С другой стороны, в северо-западной части исследуемой территории, ореолы интенсивно проявленных гидротермально-метасоматических образований тяготеют к краевым, приконтактовым частям мезозойских интрузий.*

Основной объем зон приходится на слабо- и умереннопроявленные ассоциации, составляющие в среднем 5-20% объема исходной породы. В поле переменной проницаемости пород они фактически являются «внешними» зонами однофациальных локально проявленных метасоматитов, переход между которыми осуществляется через ряд промежуточных зон различной интенсивности новообразованной минерализации.

Выделены два типа гумбеитов, различающихся по структурной позиции, содержанию петрогенных окислов, типу и характеру рудоносности: эльконский – внутриразломные гумбеиты – преимущественно урановорудные; рябиновый – около- и внутриинтрузивные гумбеиты – преимущественно золоторудные. Возраст гумбеитов рябинового типа (ре-ний-осмиевое датирование) составляет 129,1 млн лет.

**Рудная минерализация в гумбеитах (А1) Эльконского золото-урановорудного узла** изучалась в 20 прозрачно-полированных шлифах с нанесенным углеродным напылением на приборе *CamScan MV 2300* с энергодисперсионным микроанализатором *LINK Pentafet (Oxford Instr.)*. Характер взаимоотношений и последовательность образования рудных минералов изучались в отраженном свете на микроскопе *Leica DM 2500* с видео-приставкой *DFC 420*.

При сопоставлении материалов предыдущих работ [2] и проведенных нами в 2008-2011 гг. специальных геологических и петрографо-геохимических исследований рудоносных гидротермально-метасоматических образований и рудной минерализации было установлено разделение комплексного золотоуранового оруденения, проявленного в пределах Эльконского рудного узла, на три типа:

- эльконский (Au, U) тип оруденения в гумбеитах фации G1+G2, проявленный в юго-восточном геолого-структурном блоке Эльконского рудного узла, которому в минеральном отношении предположительно соответствуют золото-коффинит-браннеритовые, золото-молибденит-коффинит-браннеритовые руды;
- рябиновый (Au-Cu-порфиновый) в гумбеитах фации G3+G4, которому предположительно соответствует золотопорфиновый тип оруденения, проявленный в северо-западном геолого-структурном блоке Эльконского рудного узла;
- комбинированный элькон-рябиновый (Au, Cu, Mo+Au, U) тип оруденения в гумбеитах фации G3+G4, которому предположительно соответствуют золото-браннерит-уранинитовые руды и браннерит-серебряно-золотые руды, также проявленный в северо-западном геолого-структурном блоке Эльконского рудного узла.

**Рудная минерализация в гумбеитах фации G1+G2 (юго-восточный блок, эльконский (Au-U) тип оруденения).** Гумбеиты данной фации, тяготеющие к осевым участкам подновленных древних зон и собственно мезозойским разрывным нарушениям, характеризуются наличием наиболее раннего золотоуранового оруденения в пределах Эльконского рудного узла. Золото в изученных гидротермально-метасоматических образованиях свя-

зано, скорее всего, с пиритом и дает устойчивые средние содержания до 1,5-2 г/т по породе. Среднее содержание золота в пирите из гумбеитов фации G1+G2 по литературным данным [2] составляет до 75-80 г/т. Золотосодержащий пирит представлен мелкими (от 0,001 до 0,1 мм) округлыми, иногда неправильной формы зернами. В составе пирита, в ходе наших исследований, зафиксировано повышенное содержание серы (до 60-70%), присутствуют примеси (*As* – 0,39% и *Pb* – 0,61%). Кроме того, золото может встречаться в виде самородных выделений медистого золота и продуктов разложения золото-содержащего пирита и минеральных фаз золота с содержанием серебра от 40,88 до 51,53%.

Основным первичным урановым минералом Эльконского рудного узла является собственно *урановая разновидность браннерита*, который развивается в гумбеитах фации G1+G2 в виде цемента микробрекчий (мощностью до 1 см) и микропрожилков (мощностью около 0,1 мм). Кроме браннерита, в цементе присутствуют мелкие зерна кварца, калишпата, а также обломки более ранних образований пирита, марказита и галенита.

Браннерит в основном встречается в виде коломорфоподобной массы, где образует тесные срастания с минералами рудовмещающих гидротермально-метасоматических образований, что крайне затрудняет диагностирование его структуры под микроскопом. Еще одной характерной особенностью браннерита является образование сростков с игольчатым оксидом титана. Для браннерита характерно присутствие вольфрама (*W* до 6,2%) и ванадия (*V* до 2%).

Помимо браннерита, урановая минерализация представлена также силикатом урана – *коффинитом*, образующим коломорфные агрегаты в ассоциации с пиритом, замещая, по-видимому, темноцветные минералы исходной породы. Общее количество коффинита (по литературным данным) от суммы урановых минералов составляет около 10-15%.

**Рудная минерализация гумбеитов фации G3+G4 (северо-западный блок, рябиновый (Au-Cu-порфировый) и комбинированный элькон-рябиновый (Au, Cu, Mo+Au, U) типы оруденения).** Для гумбеитов фации G3+G4, в отличие от гумбеитов фации G1+G2, характерно развитие рудной минерализации, наложенной на оруденение более ранних этапов гидротермально-метасоматической активности. Основными урановыми минералами являются браннерит и уранинит, а также силикаты, арсениды урана. *Уранинит* образует вытянутые уплощенные кристаллы, чаще всего встречается в ассоциации с гидроокислами железа. Размер его зерен около 100  $\mu\text{m}$ . *Браннерит* в изучаемых образцах претерпевает разрушение с образованием зоны выноса в краевых частях зерен, где отмечено падение содержаний  $\text{UO}_2$  с 52,70 до 35,13% и увеличение титанистости с 32,14 до 42, 32%. Далее по мере удаления от зоны наблюдается обратная тенденция – падение титанистости и увеличение содержания  $\text{UO}_2$ . При разложении браннерита происходит образование различных сложных минералов урана с содержаниями  $\text{CO}_2$  (до 30,31%) и  $\text{As}_2\text{O}_3$  (до 15%), а также  $\text{TiO}_2$  (до 20%).

*Арсенаты и силикаты урана* замещают первичные рудные минералы *группы блеклых руд, относящихся к рябиновому (Au-Cu-порфировый) типу оруденения*. Можно предположить, что высокие содержания  $\text{CuO}$  (до 14,67%),  $\text{As}_2\text{O}_3$  (до 19%) в урановых минералах, возможно, могут свидетельствовать о перераспределении вещества в ходе замещения ими минералов группы блеклых руд. Арсенаты и силикаты урана образуют мелкую вкрапленность в кварце исследованных образцов, заполняя поры выщелачивания и мелкие трещины деформации, которые могли служить флюидопроводником для рудообразующих растворов. *Фосфаты урана* представляют собой уплощенные вытянутые зерна размером около 100-150  $\mu\text{m}$  и образуют устойчивые ассоциации с нонтронитом. В ходе про-

веденных исследований была обнаружена ванадиевая минерализация, представленная минералом *фольбартитом*, что, по-видимому, объясняет повышенные содержания ванадия (до 400 г/т) в целом по северо-западному блоку Эльконского рудного узла.

**Зона гематитизированных брекчий, развитых в пределах юго-восточного блока Эльконского золото-урановорудного узла.** При проведении полевых исследований 2008 года в восточной части Эльконского узла в пределах Сохсолоохской зоны региональных разрывных нарушений выявлена зона интенсивных гидротермально-метасоматических преобразований. *Внешняя зона ореола* гидротермально-метасоматических изменений представлена сильно кавернозными породами федоровской серии и гранитоидов древнеалданского комплекса. Отмечается замещение первичных темноцветных минералов хлоритом и эпидотом; слабо проявлена серицитизация и гематитизация. *Внутренняя зона ореола* сложена милонитами, бластокатаклазитами, высокотемпературными кварц-полевошпатовыми метасоматитами и мезозойскими морион-полевошпатовыми брекчиями с гематитом. В пределах зоны установлена чрезвычайно интенсивная гематитизация, эпидотизация и гумбеитизация. Отмечено появление мусковита, флюорита, фосфатов, торита и торианита. Для гидротермалитов внутренней зоны характерно аномально высокое содержание: *U до 308 г/т, Th до 33100 г/т, Zr до 8520 г/т, Y до 898 г/т, Ce до 1500 г/т, Nb до 693 г/т, Pb до 1500 г/т, Sn до 300 г/т, V до 800 г/т.*

Исходя из геохимических характеристик выявленных гематитовых брекчий и их вещественного состава, мы предполагаем, что они близки к рудным гематитовым и гематит-гранитовым брекчиям комплексного (Cu-U-Au-Ag) месторождения Олимпик Дэм (Австралия). В полевой сезон 2009 года горными работами, проведенными Алданским филиалом ГУ ГПП (Я) «Якутскгеология», был выявлен ряд крупных глыб подобных брекчий.

Для уточнения масштабов проявления в данном регионе тел рудоносных гематитовых брекчий и определения их перспектив промышленной рудоносности (по аналогии с брекчиями месторождения Олимпик Дэм) рекомендуется проведение здесь дополнительных геолого-геофизических исследований.

**Прогнозно-металлогеническое районирование изученной территории Эльконского золото-урановорудного узла.** Итоговым картографическим документом, составленным на основе изучения минералого-геохимических особенностей гидротермально-метасоматически измененных пород в полном объеме их проявления, в том числе и околорудных метасоматитов, является *Карта прогнозного металлогенического районирования Эльконского золото-урановорудного узла* масштаба 1:50 000. На карте показаны:

- схема металлогенического районирования с обоснованными тремя областями оруденения и связанными с ними ореолами интенсивного развития различных гидротермально-метасоматических образований:
  - *область развития эльконского (AuU) типа оруденения* с интенсивно проявленными ореолами гумбеитовой ассоциации (G1+G2),
  - *область развития рябинового (Au-Cu-порфирового) типа оруденения* с ореолами гумбеитовой ассоциации (G3+G4),
  - *область развития комбинированного элькон-рябинового (AuCuMo+AuU) типа оруденения* с ореолами гумбеитовых ассоциаций (G1+G2 и G3+G4);
- значения содержаний геохимических параметров *Au•Ag•U•As•Sb•Sb•Hg* и *Au•Ag•Cu•Mo•Bi•Pb* (рис. 4, 5), а также локальные аномалии *Au, Ag, U*;
- схемы распределения гумбеитов (G3+G4), щёлко-амфиболовых пропилитов (P3), скарнов (S1+S2) и фенитов (F3+F4) для северо-западной части изучаемой территории

и схема распределения гумбеитов ( $G1+G2$ ) и березитов ( $B1+B2+B3$ ) для юго-восточной части эльконского золото-урановорудного узла.

Выделены участки, в пределах которых, в порядке очередности, следует провести, исходя из сочетания в их пределах благоприятных признаков уранового и золотого оруденения, крупномасштабные (1:10 000 и крупнее) поисковые работы с бурением скважин на уран и рудное золото.

На рис. 6, 7 приведено сопоставление результатов прогнозно-металлогенического анализа по изученной территории Эльконского золото-урановорудного узла с прилегающими урановорудными и золоторудными территориями (с использованием материалов ЗАО «Атомредметзолото».

**Ресурсный потенциал урана и золота на прогнозируемых участках Эльконского золото-урановорудного узла.** Анализ составленной карты прогнозного металлогенического районирования позволил выделить в ее пределах 4 участка общей площадью 59,54 км<sup>2</sup>, наиболее благоприятных для постановки поисковых горных работ и детальных разведочных работ на предмет выявления здесь уранового и золотого оруденения. Площади Восточная и Шанго предлагаются для первоочередной постановки крупномасштабных (1:10 000 и крупнее) поисковых работ. Эти площади располагаются в области развития собственно эльконского ( $Au-U$ ) типа оруденения (рис. 7), что было определено на основе выполненного нами районирования Эльконского рудного узла по типам ожидаемого оруденения. В пределах этих двух площадей (Восточная и Шанго) ожидаются ресурсы  **$P_2$  «компактных» геолого-промышленных типов: по урану > 235 тыс. тонн, по золоту > 88,5 тонн и по серебру 1632 тонны.**

Если же учесть возможность обнаружения на этих площадях *крупнообъемного геолого-промышленного типа* золотосеребряного оруденения, то здесь же мы можем ожидать ресурсы золота **по категории  $P_2$  до 300 тонн золота.**

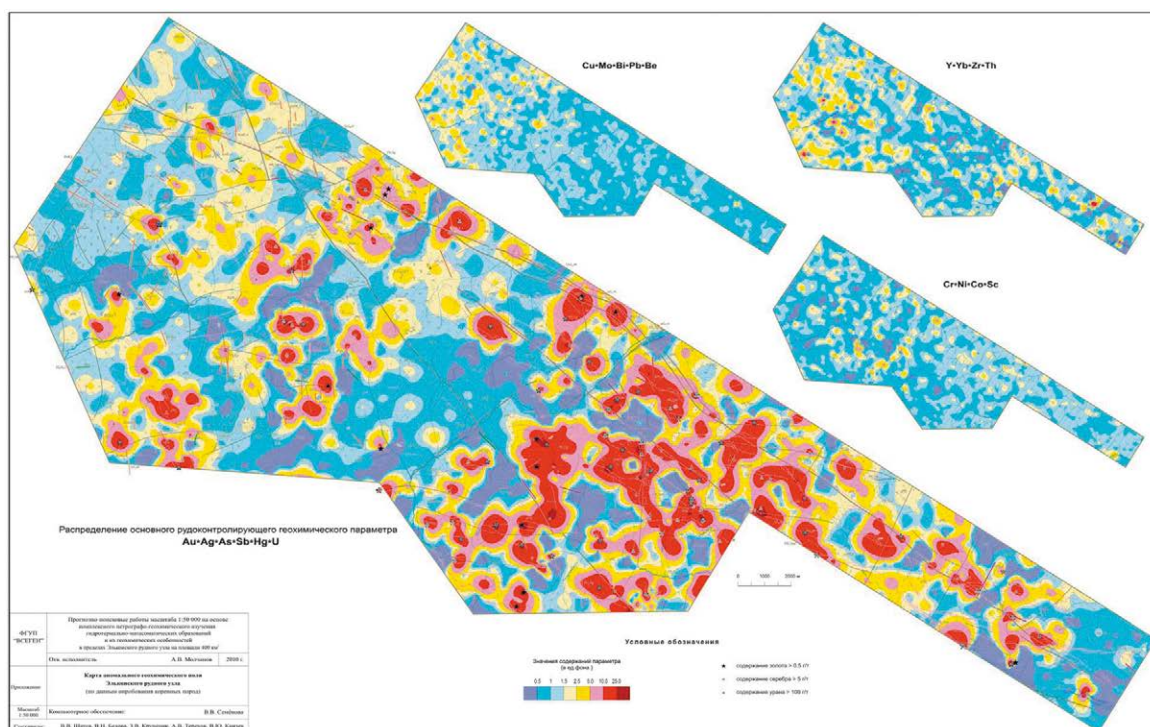


Рис. 4. Карта аномального геохимического поля Эльконского рудного узла



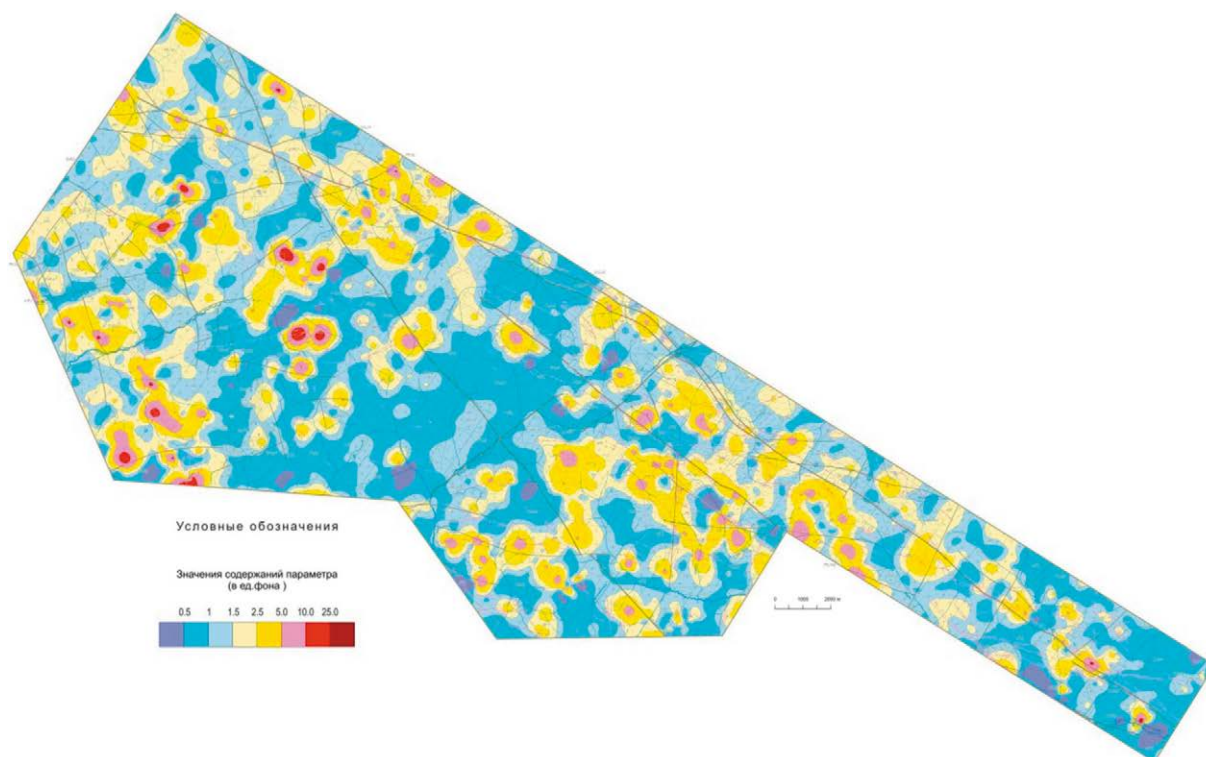


Рис. 5. Карта аномального геохимического поля Эльконского рудного узла. Карты изолиний распределения геохимических полей мультипликативного параметра  $Au \cdot Ag \cdot Cu \cdot Mo \cdot Bi \cdot Pb$  в пределах Эльконского золото-урановорудного узла

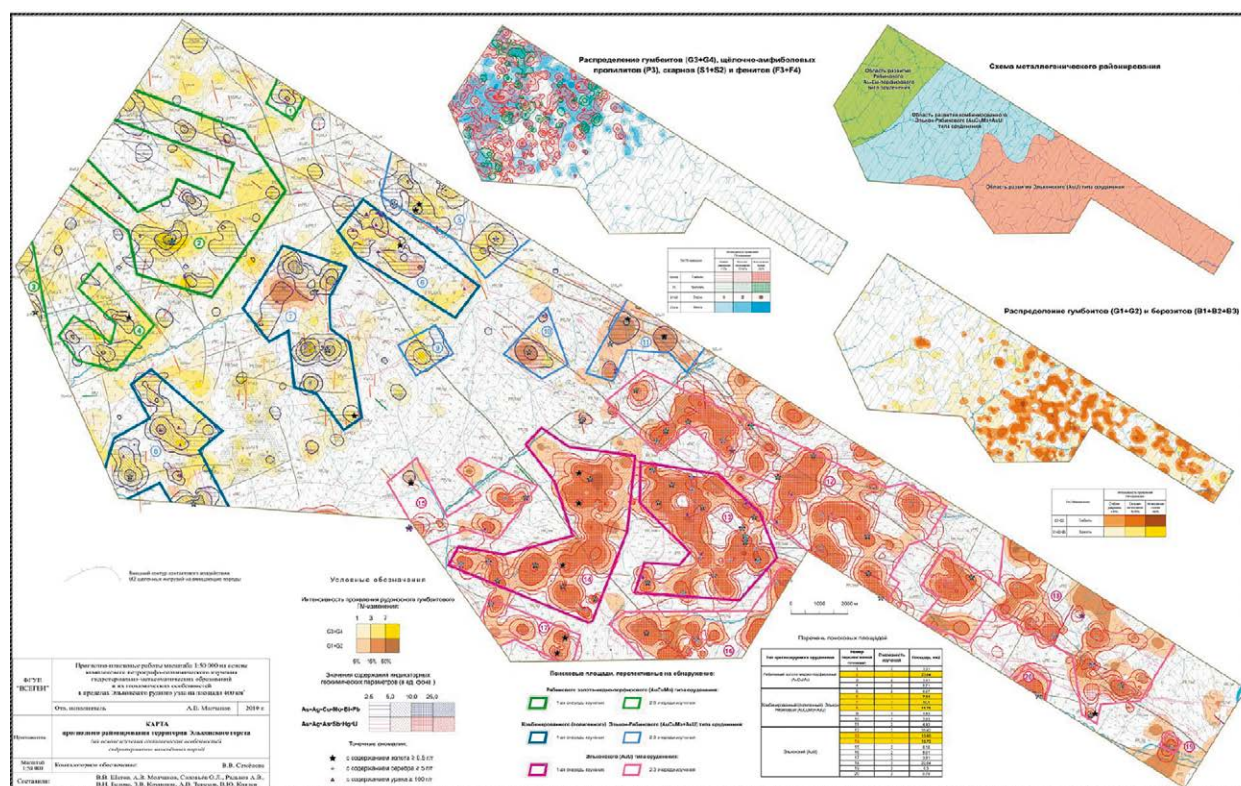


Рис. 6. Карта прогнозного районирования территории Эльконского рудного узла (на основе петрографо-геохимического изучения гидротермально изменённых пород)



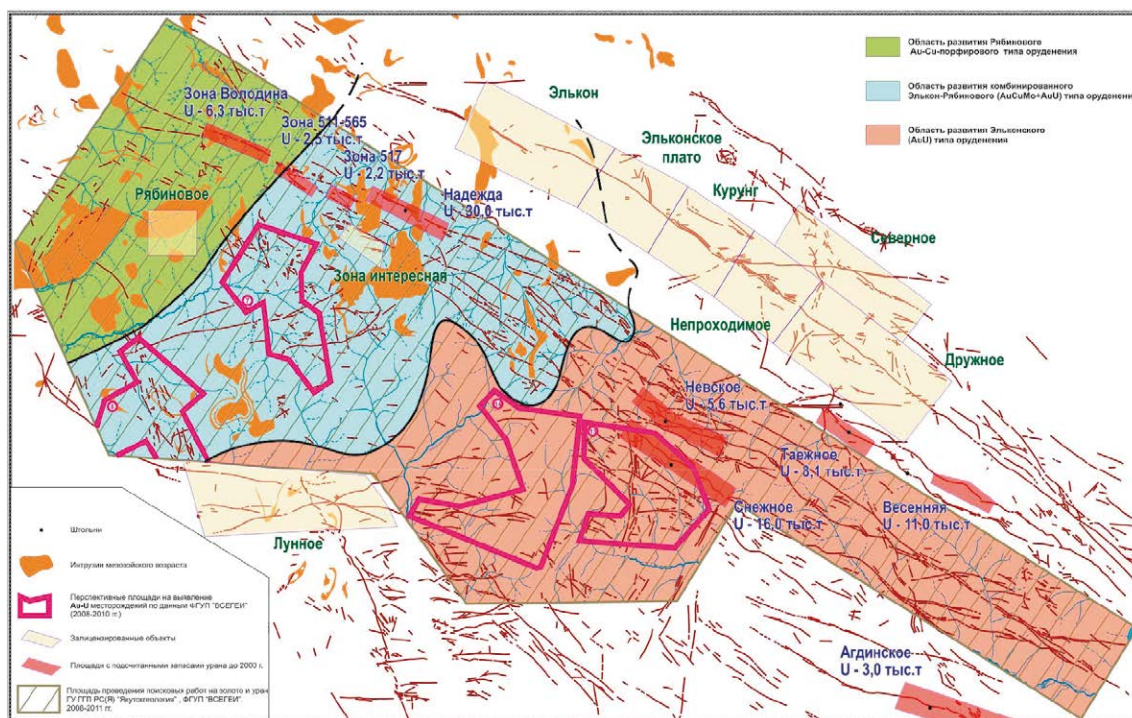


Рис. 7. Сопоставление результатов прогнозно-металлогенического анализа по изученной территории Эльконского золото-урановорудного узла с прилегающими урановорудными и золоторудными лицензированными территориями (с использованием материалов АО «Атомредметзолото»)

## Заключение

В результате выполненных работ на основе тщательного петрографо-геохимического изучения гидротермально-метасоматических образований в полном объеме их проявлений составлена *Карта прогнозного металлогенического районирования Эльконского золото-урановорудного узла* масштаба 1:50 000, на которой выделены площади, наиболее перспективные для проведения крупномасштабных поисковых работ, включая бурение, на традиционный для региона тип золотоуранового оруденения («эльконский») в региональных зонах разрывных нарушений, претерпевших полихронную гидротермально-метасоматическую проработку. Также намечены площади, где ожидается выявление и относительно нового для региона золото-порфирового типа оруденения. Первоочередными для постановки крупномасштабных поисковых работ с бурением предлагаются две площади – Восточная и Шанго, в сумме занимающие 35 км<sup>2</sup>, в пределах которых ожидается выявление объектов с ресурсами  $P_2$ : по урану – более 235 тыс. тонн, по золоту – до 300 тонн, включая золото-порфировый геолого-промышленный тип (рябиновский тип).

По результатам минералого-петрографических исследований установлено, что в юго-восточной части Эльконского рудного узла, в местах пересечения разнонаправленных рудоносных структур, ореолы гидротермально-метасоматических образований слагают в общей сложности участок, имеющий сложную форму (бассейн рек Юкунгра, Холодная, Курунг), площадью порядка 35 км<sup>2</sup> (см. рис. 6, 7); в северо-западной части исследуемой территории ореолы интенсивно проявленных гидротермально-метасоматических образований тяготеют к краевым, приконтактовым частям мезозойских интрузий.

На основе анализа материалов комплексных петрографо-геохимических исследований каменного материала выполнено районирование Эльконского золото-урановорудного узла с выделением трех областей, где можно ожидать оруденение различных типов в связи с развитием процессов гумбеитизации: а) область развития эльконского (*Au-U*) типа оруденения; б) область развития рябинового (*Au-Cu*-порфирового) типа оруденения; в) область развития комбинированного элькон-лунно-федоровско-рябинового (*Au-U + Au-Cu-Mo*) типа оруденения (рис. 7).

Охарактеризована рудная минерализация, развитая в гумбеитах Эльконского золото-урановорудного узла.

Выполнены геохимические исследования региона по первичным ореолам рассеяния элементов, проведена статистическая обработка данных аналитических работ, факторный анализ. Установлены фоновые содержания различных химических элементов в неизменных геологических образованиях, слагающих Эльконский рудный узел, осуществлено нормирование геохимических данных на их фоновые содержания в неизменных породах. Составлены в изолиниях моно- и полиэлементные геохимические карты, а также карты геохимической зональности Эльконского золото-урановорудного узла. Выявлены индикаторные геохимические параметры для «эльконского» и «рябинового» типов оруденения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Бойцов В.Е., Верчеба А.А., Пилипенко Г.Н., Жданов А.В. Металлогеническое районирование Центрально-Алданского рудного района Республики Саха (Якутия) // Геология и разведка, 2010. — № 5. — С. 23-32.
- 2) Бойцов В.Е., Пилипенко Г.Н. Золото и уран в мезозойских гидротермальных месторождениях Центрального Алдана (Россия) // Геология рудных месторождений, 1998. — № 4. — С. 354-369.
- 3) Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году. / Ред. Д.Д. Тетенькин, Е.И. Петров. М.: Роснедра, 2023.
- 4) Казанский В.И., Максимов Е.П. Геологическая позиция и история формирования Эльконского урановорудного района (Алданский щит, Россия) // Геология рудных месторождений, 2000 — № 3. — С. 212-230.
- 5) Тарханов А.В., Бугриева Е.П. Современное состояние ядерной энергетики и минерально-сырьевой базы урана в мире и в России / Под ред. Г.А. Машковцева. «Минеральное сырье». Серия геолого-экономическая, № 40. М.: ВИМС, 2024. — 79 с.
- 6) Уран Российских недр / Под ред. Г.А. Машковцева. М.: ВИМС, 2010. 855 с.

# ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ, ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПОИСКОВ ЛИТИЕВЫХ ПЕГМАТИТОВ (НА ПРИМЕРЕ КОЛМОЗЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

Морозова Л.Н.  
ФГБУ «ВИМС», Москва

Редкометалльные пегматиты семейства *LCT* (литий-цезий-тантал) по классификации [9] включают определенную группу гранитных пегматитов. Среди пегматитов *LCT*-семейства выделяются следующие типы: берилловый, комплексный, альбит-сподуменовый и альбитовый. Основные минералы *LCT*-пегматитов – кварц, калиевый полевой шпат, альбит и мусковит. Основные минералы литиевой руды – сподумен, петалит и лепидолит; цезий в основном концентрируется в поллучите; а тантал и ниобий – в минералах группы колумбита. В пегматитах *LCT*-типа основным минералом оловянной руды является касситерит, а бериллиевой руды – берилл. Типичные акцессорные минералы включают гранат, апатит, турмалин. Примерами крупных месторождений редкометалльных пегматитов альбит-сподуменового типа служат месторождения Кингс-Маунтин (Северная Каролина, США), Вольта-Гранде (Бразилия), Колмозерское (Кольский полуостров, Россия), Тастыгское (Тува, Россия), Завитинское (Восточное Забайкалье, Россия). К месторождениям редкометалльных пегматитов комплексного типа относятся месторождения Танко (Манитоба, США), Бикита (Зимбабве), Гринбушес (Австралия), Гольцовое (Восточные Саяны, Россия), Коктогай (Китай).

Около четверти мирового производства лития, большая часть производства тантала и все производство цезия приходится на пегматиты *LCT*-типа [8]. В связи с этим на сегодняшний день весьма актуальны вопросы поиска редкометалльных пегматитов на основе геологических, геохимических и минералогических критериев.

Колмозерское месторождение наиболее изучено современными геохимическими и минералогическими методами и детально разведано геологическими методами. Это обусловлено тем, что в 2023 г. госкорпорация «Росатом» и ПАО «ГМК Норильский никель» получили лицензию на разработку Колмозерского месторождения. Месторождение мирового уровня, относится к альбит-сподуменовому типу и служит эталоном для выделения геологических, геохимических и минералогических критериев на поиски литиевых пегматитов.

Колмозерское месторождение входит в состав Кольского редкометалльного пегматитового пояса [4, 5] северо-восточной части Фенноскандинавского щита и составляет часть Титовско-Поросозерской золото-молибден-редкометалльной металлогенической зоны [1]. Месторождение приурочено к Патчемварекскому массиву метагаббро-анортозитов, расположенному в зоне сочленения архейских структур регионального уровня – Мурманской и Кольской провинций. Эта зона долгое время рассматривалась как линейная мобильно-проницаемая зона (глубинный разлом) архейского возраста. Эта тектоническая структура с позиций современной геологии интерпретируется как архейский зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья или зона трансформационного сдвига (transcrustal shear zones). Вследствие своей высокой проницаемости зоны трансформационного сдвига были каналами, по которым циркулировали ру-

доносные флюиды, при этом рудные компоненты осаждались не только внутри зон, но и в их бортах [10].

На Колмозерском месторождении:

- 1) морфологически рудные тела пегматитов представляют собой плитообразные дайки (жилы) большой протяженности и мощности;
- 2) концентрическая зональность в дайках пегматитов отсутствует;
- 3) рудные тела группируются в пределах узких тектонических зон;
- 4) рудные тела сближены друг с другом, имеют сходные элементы залегания и крутые или средние углы падения.

В пределах Колмозерского пегматитового поля были выделены полевошпатовые пегматиты с Ве-минерализацией, мусковит-полевошпатовые пегматиты с *Be-Nb-Ta*-минерализацией и альбит-сподуменовые пегматиты (Колмозерское месторождение) с *Be-Nb-Ta-Li*-минерализацией [3, 7]. Было установлено, что полевошпатовые пегматиты характеризуются повышенными содержаниями *Sr* (98 ppm), *Ba* (446 ppm), *Y* (3,3 ppm), *REE* (19,9 ppm), высокими величинами индексов фракционирования — *Mg/Li* (10,8) и *Zr/Hf* (14,49), и низкими концентрациями *Li* (65 ppm), *Nb* (30 ppm), *Ta* (9,3 ppm) по сравнению с мусковит-полевошпатовыми и альбит-сподуменовыми пегматитами. От полевошпатовых пегматитов к альбит-сподуменовым пегматитам отмечается уменьшение содержаний  $\Sigma REE$ , *Ba*, *Sr* и величины отношений (индексов фракционирования) — *Zr/Hf* и *Mg/Li*, и увеличение содержаний *Li*, *Nb*, *Ta* [7].

**Состав минералов.** Согласно ранее полученным результатам [3] и новым данным, рудные тела колмозерских альбит-сподуменовых пегматитов включают следующие разновидности пород: сподуменовый пегматит, сподумен-полевошпатовый пегматит, кварц-сподуменовый пегматит, альбитовый пегматит, кварц-альбитовый пегматит, кварц-полевошпатовый пегматит. Основная часть рудных тел (85-90 об. %) сложена сподуменовым и сподумен-полевошпатовым пегматитами. Кварц-сподуменовый пегматит блоковой структуры отмечается редко и слагает осевые части рудных тел. Альбитовый пегматит был задокументирован в различных частях рудных тел и замещает вышеперечисленные разновидности пегматитов. Кварц-альбитовый пегматит преимущественно развит в зоне контакта с вмещающими породами. Кварц-полевошпатовый пегматит в основном слагает маломощные жилы пегматитов. Из каждой разновидности пегматитов был изучен химический и редкоэлементный состав порообразующих минералов методами *LA-ICP-MS* и электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа.

*Сподумен* является главным порообразующим минералом и основным минералом лития в колмозерских пегматитах. На его долю приходится до 96,95 % оксида лития от валового содержания в пегматитах, а на другие минералы — чуть больше 3 %. В колмозерских пегматитах содержание сподумена составляет 18-20 об. % [3]. Согласно результатам химического анализа, среднее содержание  $Li_2O$  в колмозерском сподумене составляет 7,44 мас. % [6]. Близкие значения  $Li_2O$  имеет сподумен из пегматитов Урикского месторождения в Саянах (7,1-7,5 мас. %) [2] и сподумен из пегматитов литиевого месторождения Вольта Гранде в Бразилии (7,15 мас. %) [13]. Сподумен сравнительно равномерно распределен по простиранию, падению и мощности рудных тел и представлен тремя морфотипами (генерациями). Сподумен непрозрачный, редко полупрозрачный, серовато-зеленоватого цвета, редко зеленого или с розовым оттенком цвета. Кристаллы уплощенно-призматического габитуса, варьирующего от коротко- до длиннопризматического. 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 колмозерского сподумена, 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. Исходя из морфологии включений и их расположения во вмещающем сподумене можно предполагать прото- и сингенетичную природу большинства минеральных включений. 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  $Fe_2O_3/MnO$  (10,75-17,57 и 4,63-9,80, соответственно) [6]. Было изучено распределение микроэлементов в колмозерских сподуменах [12]. Помимо  $Li$ ,  $Al$  и  $Si$ , сподумен содержит второстепенные элементы –  $Fe$ ,  $Mn$ ,  $Na$  при преобладании  $Fe$ . 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  $Na$ . Доминирование  $Fe$  над другими элементами-примесями отмечается в сподуменах из редкометалльных пегматитов других регионов мира. В то же время во вторичном сподумене, который замещает петалит (месторождение Танко, Канада), доминирует  $Na$ .

Плаггиоклаз является породообразующим («сквозным») минералом альбит-сподуменных пегматитов Колмозерского месторождения. Среднее содержание плаггиоклаза в колмозерских пегматитах составляет 30-33 об. %. В ранних исследованиях было показано, что плаггиоклаз в различных частях жил колмозерских пегматитов по химическому составу отвечает альбиту и представлен различными морфологическими разновидностями, включая: мелкозернистый альбит ( $An_{3-10}$ ), таблитчатый альбит ( $An_{0-10}$ ), мелкопластинчатый альбит ( $An_{0-3}$ ), крупнопластинчатый альбит ( $An_{0-3}$ ), клевеландит ( $An_{0-3}$ ), сахаровидный альбит ( $An_{0-4}$ ) и копьевидный альбит ( $An_0$ ) из каверн выщелачивания [3].

Для плаггиоклазов были изучены спектры распределения редкоземельных элементов ( $REE$ ). Сумма  $REE$  в плаггиоклазе из сподуменных и сподумен-полевошпатовых пегматитов составляет 4,06 и 4,40 ppm соответственно. В альбитовых и кварц-альбитовых пегматитах сумма  $REE$  составляет 3,73 и 3,94 ppm соответственно и сопоставима с такой в сподуменном и сподумен-полевошпатовом пегматитах. Графики распределения  $REE$  для плаггиоклазов имеют сходный рисунок и характеризуются дифференцированным спектром с положительной  $Eu$ -аномалией. В плаггиоклазах концентрации  $Rb$  варьируют от 8 до 46 ppm,  $Sr$  – от 6 до 81 ppm,  $Ba$  – от 4 до 88 ppm. Средние концентрации  $Li$  в альбитах из сподуменного пегматита составляют 4,3 ppm, из сподумен-полевошпатового пегматита – 4,9 ppm, из кварц-альбитового пегматита – 3,0 ppm и из альбитового пегматита – 3,7 ppm.

**Мусковит.** В колмозерских пегматитах на долю мусковита приходится 5-6 об. %. Мусковит равномерно распределен в породе, а на отдельных участках образует гнездовые скопления. В мусковите из сподуменного, сподумен-полевошпатового и кварц-альбитового пегматита отмечаются повышенные концентрации  $Li$  (1118, 765 и 1470 ppm соответственно),  $Rb$  (16256, 8379 и 6333 ppm) и  $Cs$  (150, 334 и 265 ppm). Наибольшее отличие по содержанию элементов-примесей показывает мусковит из альбитовых пегматитов, который обеднен  $Li$ ,  $Rb$ ,  $Cs$ ,  $Fe$ ,  $Mn$ ,  $Zn$ ,  $Ga$ ,  $Ti$ ,  $Tl$  и обогащен  $Ca$ ,  $Na$  и  $Mg$  по сравнению с мусковитом из вышеописанных разновидностей пегматитов.

Колмозерский мусковит по сравнению с мусковитом из пегматитов Завитинского месторождения имеет более высокие концентрации *Rb* (среднее, 9922 и 3750 *ppm* соответственно), *Cs* (274 и 118 *ppm* соответственно) и *Be* (46 *ppm* и не определен соответственно), более низкие концентрации *Li* (1000 и 2930 *ppm* соответственно) и *Zn* (263 и 530 *ppm* соответственно) и сопоставимые концентрации *Tl* (49 и 49 *ppm* соответственно) и *Sn* (595 и 555 *ppm* соответственно).

*Калиевый полевой шпат (микроклин)* – пороодообразующий минерал колмозерских пегматитов; по данным В.В. Гордиенко [3], на его долю приходится 10-25 об. % в объеме жил пегматитов. Было проведено сравнение состава микроклина из альбит-сподуменовых и полевошпатовых пегматитов Колмозерского пегматитового поля. Результаты исследований показали, что:

1) в альбит-сподуменовых пегматитах главными элементами-примесями в микроклине являются *Rb*, *Cs*, *Li* и *Tl*, которые входят в кристаллическую решетку минерала в следующем порядке:  $Rb \gg Cs > Li > Tl$ ;

2) от микроклинов из полевошпатовых пегматитов к микроклинам из альбит-сподуменовых пегматитов отмечается уменьшение величин отношений  $K/Rb$ ,  $K/Tl$ ,  $K/Cs$ ,  $K/Li$  и увеличение величин отношений  $K/Ba$ ,  $K/Sr$ ,  $Rb/Sr$ ,  $Rb/Ba$ . Полученные результаты позволяют произвести оценку отдельных пегматитовых тел в пределах пегматитового поля на редкометалльное оруденение [11].

Результаты исследований также показали, что колмозерский блоковый микроклин из сподумен-полевошпатового пегматита обогащен *Rb* (среднее, 11087 *ppm*), *Li* (224 *ppm*), *Cs* (698 *ppm*), *Tl* (133 *ppm*) и обеднен *Sr* (8,5 *ppm*), *Ba* (20 *ppm*) и *Pb* (39 *ppm*). Микроклин по сравнению с плагиоклазом обогащен *Li* (более, чем в 40 раз), *Rb* (в 765 раз), *Cs* (в 7750 раз), *Tl* (в 11640 раз) и *Pb* (в 20 раз), но имеет более низкие концентрации *Sr* и *Ba*.

Калиевый полевой шпат из пегматитов Колмозерского месторождения по сравнению с калиевым полевым шпатом из пегматитов Завитинского имеет более высокие концентрации *Rb* (среднее, 11088 и 3470 *ppm* соответственно), *Cs* (698 и 153 *ppm* соответственно), *Tl* (133 и 21 *ppm* соответственно) и более низкие концентрации *Li* (224 и 486 *ppm* соответственно), *Ba* (20 и 66 *ppm* соответственно), *Sr* (8,5 и 54 *ppm* соответственно), *Pb* (39 и 70 *ppm* соответственно), *Sn* (1,4 и 11 *ppm* соответственно).

Изученные в одном шлифе сподумен-полевошпатового пегматита концентрации лития в мусковите (среднее 890 *ppm*), микроклине (224 *ppm*) и альбите (5,3 *ppm*) показывают, что литий в этих минералах распределяется по схеме:

$$Ms_{Li} \gg Mc_{Li} \gg Ab_{Li}$$

Такие результаты могут свидетельствовать о том, что литий изоморфно более легко входит в кристаллическую структуру мусковита, замещая *Al* в октаэдрической позиции.

#### **Патчемварекский массив. Околожилные изменения. Состав минералов**

Вмещающие породы на контакте с жилами пегматитов всегда изменены. Характер этих изменений и интенсивность их проявления меняются даже в пределах одного и того же месторождения и зависят от различных факторов: состава вмещающих пород, состава и степени обогащения пегматитовых расплавов летучими компонентами, глубины формирования пегматитов, тектонической обстановки, морфологии тел и других факторов. При нахождении пегматитов в основных породах мощность зоны контактного ореола достигает 10-20 и даже 50 см, но влияние пегматитов в той или иной форме сказывается иногда на расстоянии до 5-10 м. Как правило, околожилные процессы наи-

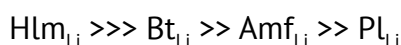


более интенсивно развиваются со стороны висячего бока рудных тел и в местах изгиба плоскости контакта [3, настоящее исследование].

Околожилные изменения вокруг колмозерских пегматитов происходят за счет выноса во вмещающие породы щелочей лития, калия и в значительно меньшей степени натрия. Это приводит к появлению во вмещающих породах новообразованных минералов, таких, как биотит, холмквистит, альбит в процессе литиевого, калиевого и в меньшей степени натриевого метасоматоза. Вынос во вмещающие породы некоторых летучих элементов —  $F$ ,  $P$  и  $B$ , приводит к кристаллизации минералов, не свойственных метагаббро. Бор в основном входит в химический состав турмалина, фосфор — в химический состав апатита. Также в метагаббро отмечается эпидот-клиноцоизит. Содержание новообразованных минералов варьирует в широких пределах — от акцессорных до второстепенных и главных минералов.

*Холмквистит* — наиболее распространенный из литиевых амфиболов. Минерал почти всегда образуется в зоне реакции между литийсодержащими пегматитами и вмещающими их горными породами, преимущественно как продукт метасоматического изменения ранее существовавших амфиболов. Колмозерский холмквистит является порообразующим, второстепенным и акцессорным минералом лития в метасоматитах по метагаббро и метасоматитах по амфиболитам. Минерал достаточно хорошо определяется в образцах и образует тонко-призматические кристаллы длиной до 10 см или ромбовидные поперечные сечения. Цвет минерала черный до темно-фиолетового. Среднее содержание лития в холмквистите из различных пород Патчемварекского массива составляет 12 062 ppm, или 2,60 мас. % в пересчете на  $Li_2O$ . Холмквистизация вмещающих пород отмечается в зоне контакта пегматитов с вмещающими породами и на расстоянии нескольких метров от контакта с пегматитовыми жилами. Наличие холмквистита во вмещающих породах может служить минералого-геохимическим критерием на поиски жил с редко-металльной специализацией.

*Биотит* присутствует в метагаббро, амфиболитах, метасоматитах по метагаббро и амфиболитам и в зонах контакта как со стороны вмещающих пород, так и в пегматитах. Биотиты из различных пород имеют повышенные концентрации  $Li$ ,  $Cs$  и  $Rb$ . Изученные в одном шлифе метагаббро концентрации лития в плагиоклазе (среднее 159 ppm), амфиболе (609 ppm), биотите (4460 ppm) и холмквистите (12 453 ppm), показывают, что литий в этих минералах распределяется по схеме:



## Выводы

1. Колмозерское месторождение приурочено к Патчемварекскому массиву метагаббро-анортозитов, расположенному в зоне сочленения архейских структур регионального уровня — Мурманской и Кольской провинций. Эта зона интерпретируется как архейский зеленокаменный пояс Колмозеро–Воронья или зона транскорового сдвига.

2. Морфологически тела пегматитов представляют собой плитообразные дайки (жилы) большой протяженности и мощности, сгруппированные в узких тектонических зонах; они сближены друг с другом, имеют сходные элементы залегания и крутые или средние углы падения.

3. Колмозерское месторождение располагается в одноименном пегматитовом поле, в котором кроме альбит-сподуменовых пегматитов (Колмозерское месторождение) с  $Be-Nb-Ta-Li$ -минерализацией присутствуют полевошпатовые пегматиты с  $Be$ -минерализацией и мусковит-полевошпатовые пегматиты с  $Be-Nb-Ta$ -минерализацией.

4. В колмозерских пегматитах основным минералом лития и главным породообразующим минералом является сподумен. Среднее содержание  $Li_2O$  в сподумене составляет 7,44 мас. %. Среди элементов-примесей в сподумене преобладают  $Na$ ,  $Mn$  и  $Fe$  при доминировании  $Fe$ .

5. Мусковит и микроклин из колмозерских пегматитов обогащены  $Li$ ,  $Rb$ ,  $Cs$ .

6. Во вмещающих породах Патчемварекского массива, а также в зонах контактов выявлены новообразованные минералы — холмквистит, биотит, турмалин, апатит, не свойственные вмещающим породам.

7. Холмквистит является основным минералом лития в метасоматитах по метагabbро. Среднее содержание лития в холмквистите составляет 12 062 ppm, или 2,60 мас. % в пересчете на  $Li_2O$ .

8. Амфибол и плагиоклаз обогащены  $Li$ , а биотит обогащен  $Li$ ,  $Rb$ ,  $Cs$  в породах Патчемварекского массива, что указывает на влияние высокофракционированных пегматитовых расплавов с редкометалльной минерализацией на породы Патчемварекского массива.

Эти результаты могут быть использованы как геологические, геохимические и минералогические критерии для поисков редкометалльных пегматитов с литиевой минерализацией.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Астафьев Б.Ю., Богданов Ю.Б., Воинова О.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист Q-37. Архангельск. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. — 2012. — 302 с.
- 2) Владимиров А.Г., Ляхов Н.З., Загорский В.Е. и др. Литиевые месторождения сподуменных пегматитов Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. — 2012. — Т. 20. — № 1. — С. 3-20.
- 3) Гордиенко В.В. Минералогия, геохимия и генезис сподуменных пегматитов. Л.: Изд-во Недр. — 1970. — 240 с.
- 4) Морозова Л.Н., Зозуля Д.Р., Скублов С.Г. Кольский редкометалльный пегматитовый пояс — важнейший источник стратегического минерального сырья ( $Li$ ,  $Be$ ,  $Nb$ ,  $Ta$ ,  $Cs$ ) в России // Разведка и охрана недр. — 2024. — № 2. — С. 36-40.
- 5) Морозова Л.Н., Серов П.А., Кунакузин Е.Л. и др. Кольский пегматитовый пояс: основные черты геологического строения // Труды ФНС ГИ КНЦ РАН. Апатиты. Изд-во K & M. — 2020. — С. 393-397.
- 6) Морозова Л.Н., Базай А.В. Сподумен из редкометалльных пегматитов Колмозерского литиевого месторождения (Кольский полуостров) // Записки Российского минералогического общества. — 2019. — Т. 148. — № 1. — 65-78.
- 7) Морозова Л.Н. Колмозерское литиевое месторождение редкометалльных пегматитов: новые данные по редкоэлементному составу (Кольский полуостров) // Литосфера. — 2018. — Т. 18. — № 1. — 82-98.
- 8) Bradley D., McCauley A.D., Stillings L.L. Mineral-deposit model for lithium-cesium-tantalum pegmatites. 2017. Denver Publishing Service Center, Denver, Colorado. — 48 p.
- 9) Černý P., Ercit T.S. Classification of granitic pegmatites: Canadian Mineralogist. V. 43. Rare-element granitic pegmatites. Part 1: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits Geoscience Canada. 2005. — Vol. 18(2). — Pp. 49-67.
- 10) McCaffrey K.J.W., Lonergan L. and Wilkinson J.J. Fractures, Fluid Flow and Mineralization. Geological Society of London. 1999. — London. — 337 pp.

- 11) Morozova L., Zozulya D., Selivanova E., Serov P., Bazai A. 2022. *Distribution of Trace Elements in K-Feldspar with Implications for Tracing Ore-Forming Processes in Pegmatites: Examples from the World-Class Kolmozero Lithium Deposit, NW Russia* // *Minerals*. – 2022. – Pp. 1-23.
- 12) 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* // *Mineral. Mag.* – 2021. – Vol. 85. – Pp. 149-160.
- 13) Lagache M. *The Volta Grande pegmatites, Minas Gerais, Brazil: an example of rare-element granitic pegmatites exceptionally enriched in lithium and rubidium* // *Canad. Miner.* – 1997. – Vol. 35. – Pp. 153-165.

## ЗОЛОТО В ДОКЕМБРИЙСКИХ ПОРОДАХ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА: ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ

Ножкин А.Д., Лиханов И.И.  
ИГМ СО РАН, г. Новосибирск

### Введение

Енисейский кряж — один из старейших золотоносных районов Сибири, в пределах которого распространены месторождения разных генетических типов. Они размещены в структурно-вещественных комплексах архея, раннего и позднего протерозоя. В Центральном металлогеническом поясе региона известен ряд крупных золоторудных месторождений и рудопроявлений. Выяснение природы уникальной рудоносности этого пояса и их связи с процессами тектономагматизма, гидротермального метаморфизма и геохимическими характеристиками вмещающих осадочно-метаморфических пород являются ключевыми в решении проблем металлогении [1].

В статье установлены особенности распределения *Au* в породах разных структурно-вещественных комплексов Енисейского кряжа, включая Ангаро-Канский блок, окраинно-континентальные образования Заангарья и островодужные ассоциации аккреционных систем. Цель работы заключается в том, чтобы показать, на каком исходном золотоносном фоне вмещающих пород создавались рудные концентрации благородного металла, и сформулировать наиболее важные геолого-геохимические предпосылки для формирования золотого оруденения в Центральном металлогеническом поясе Енисейского кряжа.

### Геологический очерк строения Енисейского кряжа

Енисейский кряж (ЕК) представляет собой древний ороген коллизионно-аккреционного типа, расположенный на западной окраине Сибирского кратона (рис. 1). В его строении выделяется два крупных сегмента, разделенные субширотным Нижнеангарским разломом. В Южно-Енисейском кряже развиты два структурных элемента — палеопротерозойский кратонный Ангаро-Канский блок и неопротерозойский островодужный Предивинский террейн. Ангаро-Канский блок сложен канским гранулит-гнейсовым и енисейским амфиболит-гнейсовым комплексами [2-3]. Предивинский террейн образован неопротерозойскими метавулканогенно-осадочными островодужными ассоциациями [4]. Северо-

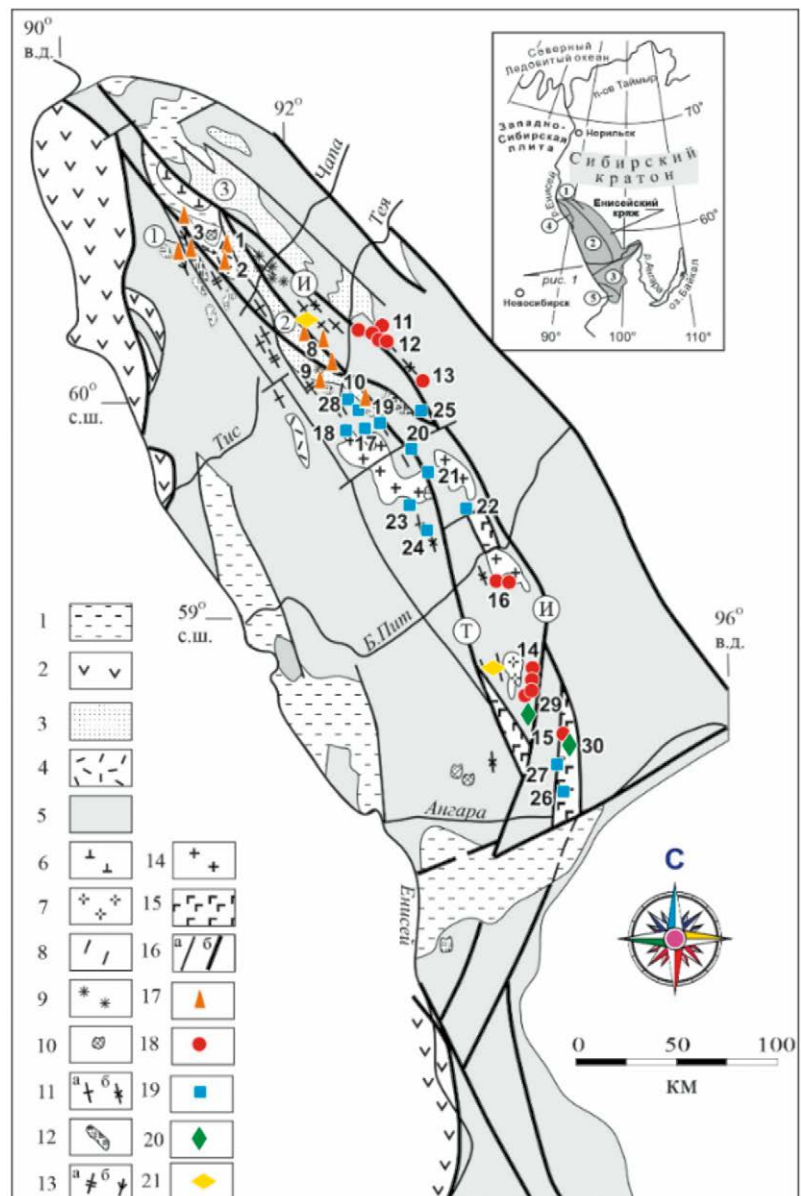
Рис. 1. Мезо-неопротерозойские рифтогенные и внутриплитные комплексы, золото-урановые и золоторудные месторождения ЦМП Енисейского кряжа

На врезке – положение тектонических блоков:

1 – Восточный и 2 – Центральный Северо-Енисейского сегмента;  
3 – Южно-Енисейский сегмент,  
4 – Исаковский и 5 – Предивинский островодужные террейны.

1 – чехол (PZ-KZ); 2 – офиолиты и островодужные комплексы (NP);  
3-4 – рифтогенные (NP) комплексы чингасанской (3) и верхневороговской серий (4);  
5 – нерасчлененные комплексы докембрия; 6-12 – рифтогенные и внутриплитные комплексы:  
6 – вороговский – траппы (Т),  
7 – татарский – граниты (~630 млн лет), 8 – карбонатиты (~650 млн лет), 9 – чапинский комплекс – щелочные пикриты (~670 млн лет), 10 – среднетатарский – фойяиты и захребетнинский – нефелиновые сиениты (700 млн лет), 11 – захребетнинский – дайки сиенит-порфиров (а) и трахидолеритов (б) (700 млн лет), 12 – кутукасский – лейкограниты (700–690 млн лет), гурахтинский – субщелочные граниты (~700 млн лет); 13 – ковригинский – дайки риолит-порфиров (а) и габбро-долеритов (б) (~750 млн лет); 14 – аяхтинский – граниты (760–750 млн лет); 15 –

мезопротерозойская пикробазальт-базальтовая и плагиориодацит-базальтовая (780 млн лет) ассоциации Рыбинско-Панимбинского пояса; 16 – разломы (а) и их зоны (б): И – Ишимбинская, Т – Татарская; 17 – золотоурановые месторождения и рудопроявления: 1 – Кедровое, 2 – Оленье, 3 – Кутукасское, 4 – Ясное, 5 – Полярное, 6 – Тейское, 7 – Марсальское, 8 – Северо-Тейское, 9 – Ногатинское и Осиновское, 10 – Дубовое; 18 – золоторудные месторождения золото-кварцевого типа: 11 – Советский, 12 – Александр-Агеевский, 13 – Перевальнинский, 14 – Партизанский, 15 – Раздольнинский, 16 – Аяхтинский; 19 – золоторудные месторождения золото-сульфидного типа: 17 – Олимпиадинский, 18 – Благодатнинский, 19 – Титамухтинский, 20 – Ерудинское, 21 – Панимбинское, 22 – Товрикульское, 23 – Золотой ключ, 24 – Ведугинское, 25 – Кварцевая гора, 26 – Попутнинское, 27 – Боголюбовское, 28 – Золотое; 20 – сурьмяные месторождения: 29 – Удережское, 30 – Раздольнинское, 21 – редкометальные месторождения. Цифры в кружках: 1 – Верхневороговская грабен-синклиналь, 2 – Уволжский грабен, 3 – Тейско-Чапский прогиб



Енисейский кряж сложен палеопротерозойскими и мезо-неопротерозойскими породами, составляющими Восточный и Центральный кратонные блоки и Исаковский (западный) островодужный террейн [5]. Все тектонические блоки разделены крупными региональными

ми разломами — системами дизъюнктивов преимущественно северо-западного простирания с субвертикальным падением [6-7]. Отличительной особенностью приразломных структур является развитие специфического комплекса тектонитов, прослеживающихся через весь ЕК в виде ряда мощных зон субмеридионального простирания [8]. Региональные разломы (Татарско-Ишимбинский и др.) часто сопровождаются оперяющими структурами, вблизи которых происходит коллизия блоков с образованием надвигов [9]. Это вызывает неоднородный по давлению региональный метаморфизм, выраженный сочетанием фациальных серий низких и умеренных давлений [10].

Гнейсы и сланцы раннедокембрийского кристаллического основания обнажаются только на поднятиях в Центральном блоке, большая часть площади которого перекрыта мезо-неопротерозойскими метавулканогенно-осадочными комплексами, прорванными гранитоидами. Восточный блок амагматичный и представляет собой сегмент западной окраины Сибирского кратона, фундамент которого перекрыт мезо-неопротерозойскими метакарбонатно-терригенными толщами общей мощностью около 10-14 км. Исаковский терреин представлен неопротерозойскими офиолитами и островодужными комплексами [11].

В Центральном блоке в конце палеопротерозоя в бассейнах шельфового типа накапливались высокоглиноземистые и углеродистые терригенные отложения с повышенной концентрацией золота 10-15 мг/т, в зонах рифтогенеза формировались породы габбро-долеритовой формации — до 5 мг/т и в сульфидизированных разностях — до 0,5 г/т.

Центральный металлогенический пояс (ЦМП) расположен в пределах Татарско-Ишимбинской системы разломов (рис. 1). Здесь многократно и наиболее контрастно проявлены тектоно-магматические процессы. На основе изотопно-геохимических данных выделены (в млрд лет) мезопротерозойский (1,6-1,05), ранний (1,05-0,8) и поздний (0,8-0,6) неопротерозойский этапы магматизма и эволюции земной коры Енисейского кряжа.

В раннемезозойское время в результате деструкции и растяжения земной коры на юго-западе Сибирского кратона произошло формирование Татарско-Ишимбинской и других систем разломов, заложение перикратонного прогиба и формирование терригенных и карбонатно-терригенных осадочных серий. Были сформированы рифтогенные базитовые ассоциации Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса и образованы мощные толщи тонкозернистых осадков сухопитской серии. Золотом оказались наиболее обогащены отдельные горизонты углеродисто-терригенных сланцев (от 5-10 до 60 мг/т), а также пикробазальт-базальтовой (4-9 мг/т) ассоциации. В вулканогенно-осадочных толщах и субвулканических интрузиях этого пояса размещены месторождения и рудопроявления золота, сурьмы и колчеданных руд [5].

В начале неопротерозоя терригенные толщи сухопитской серии в связи с орогенцией гренвилльского возраста были подвержены деформациям, метаморфизму и гранитизации, причем наиболее интенсивно в Татарско-Ишимбинской системе разломов. В более раннюю синколлизийную эпоху (1050-950 млн лет) этого этапа сформированы гранитоидные купола тейского типа. На этом же этапе сформировались высокоградиентные зональные комплексы низких давлений *And-Sil* типа при обычном для орогенеза метаморфическом градиенте  $dT/dH = 25-35^\circ \text{C/км}$  [12, 13]. В следующую позднеколлизийную эпоху (880-860 млн лет) были образованы калий-натровые гранитоидные плутоны каламинского типа, сложенные гранодиоритами и низкощелочными гранитами. В обширном контактовом ореоле, в зоне воздействия этих плутонов на вмещающие черносланцевые терригенные толщи сформированы дорудные метасоматиты, среди которых размещены

более поздние по времени образования золоторудные поля и месторождения. В эту же позднеколлизийную эпоху происходит реоморфизм и дальнейший рост гранитогнейсовых куполов, представленных ассоциацией порфиробластических микроклиновых гранитогнейсов, гнейсогранитов и лейкогранитов. Если гранитоиды имеют явно магматическое происхождение, то для первого и второго этапа развития гранитогнейсовых куполов ведущим процессом является метасоматическая гранитизация, сопровождающаяся привнесением  $K$ ,  $U$ ,  $Th$ , легких РЗЭ [5, 14]. Позднее зональные комплексы низких давлений *And-Sil* типа подверглись неопротерозойскому (с двумя пиками — 854–862 и 798–802 млн лет) [15] коллизийному метаморфизму умеренных давлений *Ky-Sil* типа с локальным повышением давления вблизи надвигов [16]. Формирование более древних метаморфических комплексов *Ky-Sil* типа (маяконский, тейский и чапский участки) происходило в результате надвига на Енисейский кряж блоков пород со стороны Сибирского кратона на рубеже ~850 млн лет, что подтверждается геофизическими данными и результатами исследований природы и возраста источников сноса [17]. Поздний повторный коллизийный метаморфизм с возрастом ~800 млн лет обусловлен встречными движениями мелких блоков восточного направления в зоне оперяющих разломов более высокого порядка (гаревский, енисейский и тисский участки) в результате аккреционно-коллизийных событий вальгальской складчатости [18]. Генетически метаморфизм умеренных давлений связан с заключительной эпохой эволюции коллизийного орогена с формированием надвигов [19]. Образование кварцево-жильных зон (месторождение Советское, Эльдorado и др.) (830–820 млн лет) связывается с формированием шарьяжно-надвиговых структур. Эти события — гранитообразование, деформации, метаморфизм — коррелируют с завершающей эпохой гренвильского орогенеза.

Заключительный этап эволюции орогена сопровождался синэксгумационным динамометаморфизмом (785–776 млн лет) с  $dT/dH \leq 15$  °C/км, отражающим тектонические обстановки быстрого подъема блоков пород в сдвиговых зонах и зонах растяжения и утонении коры, обеспечивающей резкий сброс давления не успевающей остыть среды [20]. Это доказывается тем, что заключительные стадии развития коллизийного орогена в регионе маркируются дайковыми роями бимодальных ассоциаций анорогенных гранитоидов и внутриплитных базитов рифтогенной природы с возрастными внедрениями 797–792 млн лет, связанными с неопротерозойскими процессами растяжения коры вдоль западной окраины Сибирского кратона и началом распада древнего суперконтинента Родиния [21–24].

Исследование неопротерозойских комплексов позднего этапа представляет особый интерес, поскольку с тектономагматическими процессами данного периода связано формирование золотого оруденения. В постколлизийный неопротерозойский этап формируется ряд прогибов, в том числе рифтогенных. Более ранние из них (Верхне-вороговский, Глушихинский, Каитыбинский) развиты в пределах Центрального блока Северо-Енисейского кряжа и выполнены вулканогенно-осадочными комплексами верхнего, киргитейского горизонта тунгусикской серии, сформированными после длительного перерыва и глубокой эрозии подстилающих толщ. Поздние прогибы (Тейско-Чапский, Уволжский, Приангарский) сложены в нижней части преимущественно субаэральными грубообломочными пестроцветными, а в верхней — морскими терригенно-карбонатными и карбонатными флишoidными отложениями. Неопротерозойский рифтогенный и внутриплитный магматизм наиболее многократно проявился в зоне Татарско-Ишимбинской системы глубинных разломов. В той же зоне сосредоточены проявления мезопротерозой-



ского вулканизма, а также все золоторудные и урановые месторождения ЦМП Енисейского края. Здесь выделяется четыре эпохи формирования рифтогенных структур, сопровождающихся внутриплитным магматизмом на рубежах 780, 750, 700 и 670–650 млн лет [25]. Продукты вулканизма этих эпох представлены плагиориодацит-базальтовой (возраст в млн лет) (780), риолит-базальтовой (750), трахибазальт-трахитовой (700) и щелочнопикритовой (670–650) ассоциациями [5]. Проявление вулканизма и сопутствующего интрузивного магматизма (дайки и штоки кварцевых порфиров, габбро-долеритов, щелочных сиенитов, щелочных пикритов, массивы субщелочных гранитов) происходило синхронно с накоплением терригенных отложений рыбинской толщи, верхневороговской, чингасанской и чапской серий. Вулканогенно-осадочные комплексы этих уровней формировались в приразломных прогибах-грабенах рифтогенной природы.

Плагиориодацит-базальтовая ассоциация распространена в пределах Рыбинско-Панинбинского вулканического пояса. В породах рыбинской толщи, сложенной кислыми вулканидами и черными углистыми сланцами с повышенной фоновой золотоносностью, сосредоточено золотое оруденение месторождения Попутнинское и ряда других зон.

Риолит-базальтовая ассоциация развита в пределах Верхневороговской грабен-синклинали на северо-западе ЦМП. Это типичная рифтогенная структура с широким проявлением бимодального внутриплитного магматизма. Кислые вулканиды и вмещающие субаэральные туфогенно-терригенные отложения обогащены  $U$  (4–20 г/т),  $Th$  (25–80 г/т) и  $Au$  (8–20 мг/т). В вулканогенно-терригенных образованиях синклинали расположены урановые месторождения и рудопроявления (Кедровое, Оленье и др.), отличающиеся повышенной золотоносностью.

Трахибазальт-трахитовая ассоциация слагает верхние горизонты чингасанской серии, выполняющей наложенную мульду в центральной части Верхневороговской грабен-синклинали. В пределах мульды размещены субвулканические массивы щелочных габброидов, нефелиновых сиенитов, дайки трахидолеритов и сиенит-порфиров (захребетнинский комплекс). Юго-восточнее на продолжении Татарской зоны разломов находится Уволжский грабен, выполненный отложениями чингасанской серии. В них располагаются урановые, золото-урановые зоны (Тейское, Северо-Тейское, Марсаловское и др. рудопроявления), а также месторождение  $Au$  (Золотое).

Породы щелочно-пикритовой ассоциации (пикриты, лимбургиты и их туфы) слагают трубки взрыва, дайки и покровы, размещенные в грабенах среди отложений чингасанской и чапской серий.

Таким образом проявления четырех эпох внутриплитного рифтогенного магматизма пространственно совмещены в пределах единой зоны разломов. На обрамляющих поднятиях одновременно с процессами рифтогенеза и внутриплитного вулканизма происходило становление субщелочных гранитоидов и щелочных интрузий. Так, субщелочные граниты Верхнехариузинского массива имеют  $U-Pb$  возраст  $753 \pm 4$  млн лет, аналогичный риолитам ( $753 \pm 6$  млн лет) Верхневороговской грабен-синклинали [26]. По петрохимическим признакам эти граниты сопоставимы с анорогенными А-гранитами, характерными для внутриплитных обстановок. К этому же типу относятся и субщелочные А-граниты Аяхтинского и Чиримбинского массивов с абсолютным  $U-Pb$  возрастом 760–750 млн лет [27], которые расположены южнее, в пределах этой же металлогенической зоны. Синхронно с проявлениями вулканизма трахибазальт-трахитового типа происходит формирование субщелочных А-гранитов кутукаского и нефелиновых сиенитов среднетатарского комплексов; лейкограниты Хребтового массива имеют  $U-Pb$  возраст

690±8 млн лет [26], субщелочные граниты Гурахтинского, Панимбинского и щелочные сиениты Среднетатарского массива — 700 млн лет. В следующую эпоху — 670-650 млн лет происходит становление щелочно-ультраосновных пород чапинского комплекса, щелочных метасоматитов и карбонатитов с промышленно значимой фосфор-ниобиевой минерализацией в зоне Татарского разлома. Наконец, в заключительную вендскую эпоху формируется щелочно-гранит-сиенитовая ассоциация Средневороговского комплекса (625 млн лет).

Детальный обзор геохронологии, тектонической позиции и геодинамической природы комплексов, участвующих в строении региона, приведены в работах [28-30].

### **Содержание золота в породах докембрийских комплексов Енисейского кряжа**

*Метаморфические породы.* Содержания Au показаны в породах канского гранулитового и енисейского (гаревского) амфиболит-гнейсового комплексов, а также в кристаллических сланцах и филлитах тейской и сухопитской серий, метаморфизованных в основном в эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фациях. В метаморфических породах от гранулитовой до зеленосланцевой фаций содержание Au устанавливается в пределах от 0,6 до 3,4 мг/т. Исключение составляют черные углеродистые метаосадки с концентрацией Au в 7-12 мг/т и метаморфизованные магматические породы повышенной основности и железистости (метабазиты) (3,5–5,6 мг/т). Эта особенность в распределении Au наблюдается в породах разных фаций, что свидетельствует об унаследовании концентраций благородного металла исходных протолитов. Подтверждением данного вывода служит и устойчивое снижение его содержаний в направлении от амфиболитов высокожелезистого базальтового состава к плагиоклазовым амфиболитам лейко- и андезитово-базальтового и далее к ортогнейсам андезитового и дацитового составов в метавулканитах енисейской серии [31]. Процессы ультраметаморфизма, сопровождающиеся мигматизацией в условиях амфиболитовой и чарнокитообразованием в гранулитовой фациях, приводят к перераспределению Au и, очевидно, к выносу его флюидами в верхние горизонты коры. Об этом свидетельствует снижение концентраций Au в чарнокитах и мигматитах канского комплекса в сравнении с вмещающими гранат-гиперстеновыми гнейсами. Аналогичная тенденция к выносу Au слабо проявлена и в зональных метаморфических комплексах, что можно видеть в его распределении в метапелитах зеленосланцевой эпидот-амфиболитовой фации сухопитской серии Тейского зонального метаморфического комплекса. Сказанное подтверждается тем, что гранат-биотит-кварцевые кристаллические сланцы заметно обеднены Au в сравнении с филлитами и филлитизированными глинистыми сланцами. Возможно, вынос его происходит в зону филлитов, отличающихся повышенной и более неравномерной концентрацией Au в сравнении с филлитизированными сланцами. В то же время многочисленные данные о содержании золота в однотипных по исходному составу породах, например, метапелитах разных фаций или метабазах, не свидетельствуют об уменьшении его концентраций от зеленосланцевой фации к гранулитовой. В этой связи, очевидно, нет оснований говорить о выносе золота при региональном метаморфизме такого типа. Напротив, гранат-гиперстеновые и высокоглиноземистые гнейсы метапелитового состава канского чарнокит-гранулитового комплекса более обогащены золотом в сравнении с биотитовыми гнейсами — метапелитами амфиболитовой фации енисейской, филлитами и филлитизированными сланцами зеленосланцевой фации сухопитской серии. Такие соотношения в золотоносности пород разных фациальных серий унаследованы от исходных протолитов. В целом концентрация золота во всех типах метаморфических пород архея и мезопротерозоя, за исключением

черных углистых сланцев, находится на уровне средней распространенности благородного металла в метапелитах и metabазитах [31].

*Вулканогенные образования.* Золото определено в вулканических породах рифтогенных структур Рыбинско-Панимбинского и Верхневороговско-Чапинского района, расположенных в центральной зоне вулканизма в пределах Татарско-Ишимбинской системы разломов, а также в вулканитах островодужных комплексов западной зоны – в Исаковском и Предивинском террейнах. Обращает на себя внимание пониженное (в 1,5–3 раза) содержание *Au* в вулканогенных породах островодужных комплексов в сравнении с таковыми рифтогенных структур Татарско-Ишимбинской системы разломов. Исключения представляют только серпентинизированные ультрамафиты офиолитов аккреционного пояса с характерной для них более высокой (3,0–14 мг/т) концентрацией *Au*. Повышенное содержание *Au* установлено в метавулканитах базальтового и пикробазальтового состава (4,4–8,5 мг/т) и углеродистых сланцах (10–60 мг/т) рыбинской толщи Рыбинско-Панимбинского пояса. Однако в туфах и туфобрекчиях пикробазальтового состава, расположенных севернее в панимбинской толще, величина примеси *Au* значительно меньше (~1,7 мг/т). В зеленосланцево измененных metabазитах (диабазовых и лейкобазальтовых порфиритах, габброидах) Верхневороговской грабен-синклинали содержание *Au* (3,5–4,4 мг/т) соответствует кларковому – средней распространенности, установленной для базитов [31]. В субщелочных базальтах и трахибазальтах концентрация *Au* в два раза меньше (1,5–2 мг/т). Снижение содержаний *Au* в базитах (до 1,0–1,5 мг/т) происходит в процессе их амфиболитизации и карбонатизации.

*Осадочные отложения.* Содержание *Au* определено в позднеэопротерозойских терригенных и терригенно-карбонатных отложениях чингасанской серии. В песчаниках и алевролитах серии средние содержания *Au* варьируют в основном в пределах от 1,2 до 2 мг/т, в аргиллитах заметно выше (до 3,0 мг/т). Весьма низкая концентрация *Au* (0,5–0,8 мг/т) наблюдается в кварцевых и известковистых песчаниках. В чистых светло-серых доломитах и известняках содержание *Au* минимальное (0,4–0,8 мг/т), в глинисто-алевритистых и железисто-алевритистых их разновидностях несколько выше (1,2–2,0 мг/т). Этот факт может свидетельствовать о преимущественной связи *Au* с терригенной составляющей пород. Очевидно, что концентрация *Au* происходила здесь двумя путями: осаждением на минералах глинистых частиц и оксидах железа, являющихся хорошими сорбентами растворенного *Au*, а также механически в составе обломков горных пород и минералов. Повышенная примесь *Au* (3,7 мг/т) при равномерном его распределении отмечается в темно-серых битуминозных доломитах. Подобная обогащенность золотом битуминозных пород подчеркивалась многими исследователями и она обусловлена, очевидно, сорбцией *Au* органическим веществом из морской воды. В толще тиллитоподобных пород суктаьминской свиты минимальные содержания *Au* установлены в туфах трахибазальтов и известковистых песчаниках оселкового типа (0,50–0,6 мг/т), а максимальные (2,8 мг/т) – в аргиллитах. Наиболее обогащены *Au* (5,6–7,2 мг/т) базальные конгломераты и песчаники лопатинской свиты, залегающие в Уволжском, Таловском грабенах и Тейском прогибе. Эти структуры расположены в пределах Татарско-Ишимбинской зоны разломов на севере Центрального золотоносного пояса и сформированы гораздо позже времени образования основных золоторудных месторождений [5], которые могли быть источником *Au* для базальных отложений лопатинской свиты. Средне- и мелкогалечниковые конгломераты этой свиты, включающие кварцевую гальку, характеризуются весьма неравномерным распределением благородного металла, что обусловлено наличием

здесь в основном кластогенного золота. Разброс частных его значений изменяется от 1,0 до 120 мг/т. Среднее содержание *Au* в этих породах составляет 8,5 мг/т, а без учета аномальных значений — 3,7 мг/т. Песчаники и алевролиты этой свиты отличаются заметно повышенной (7,2 мг/т) концентрацией *Au*. В целом, в базальных терригенных отложениях среднее содержание *Au* в 3,5-5 раз превышает кларковые значения для осадочных пород [31]. В породах вышележащих свит среднее содержание благородного металла резко снижается и примерно соответствует кларковой величине. В карбонатных осадках существенное влияние на процессы концентрации золота оказывает примесь терригенного материала, железистого и органического вещества.

*Интрузивные комплексы.* В гранитах разных комплексов протерозоя кларковые содержания *Au* определяются в пределах 0,5-1,5 мг/т; в плагиогранитах и гранодиоритах немного выше (1,8-2,5 мг/т), в диоритах концентрация *Au* возрастает до 5-11 мг/т. Следовательно, натровые граниты более обогащены золотом в сравнении с калиевыми; кроме того, существенно возрастает концентрация золота в гибридных разностях диоритового состава, возникающих при взаимодействии гранитной магмы с более ранними базитами. Примером таких пород могут служить диориты Татарского, Каламинского и Канского массивов. Минимальное содержание *Au* (0,5-0,8 мг/т) отмечается в лейкогранитах и гранитогнейсах, обедненных фемическими компонентами в процессе магматической дифференциации или гранитизации метapelитов. Устойчиво повышена примесь *Au* в сравнении с гранитами в габброидах и пироксенитах Зимовейнинского массива, диабазах малых интрузий и даек. В щелочных породах разных комплексов фоновая концентрация *Au* примерно такая же, как и в гранитах.

*Породы золотоносных зон.* Среди метаморфических, вулканогенно-осадочных и интрузивных комплексов резко выделяются породы золотоносных районов — филлиты, а также граниты в контуре рудных полей и жильных зон, в разной степени гидротермально измененные. Для них характерны повышенные концентрации и дисперсии в распределении *Au*, что кажется вполне естественным, поскольку они подвержены гидротермальным изменениям, в той или иной степени генетически связанными с рудоносным процессом. Средние содержания золота по данным многочисленных анализов в филлитах рудных полей и зон составляют 7 и 39 мг/т, в гранитах золотоносных районов — 12 и 79 мг/т. Особый интерес представляют метасоматически измененные породы нетрадиционных золотоносных районов, например, ураноносных зон Уволжско-Ногатинской и Верхневогровской площадей. Среднетемпературные березиты и эйситы явно отличаются повышенной (в среднем  $7,4 \pm 5,1$  мг/т) концентрацией и дисперсией *Au*. В сульфидизированных разностях содержание *Au* достигает более 1500–2000 мг/т.

Проведенные исследования кларковой (фоновой) золотоносности докембрийских пород Енисейского края высокочувствительными методами позволяют считать, что содержания *Au* во всех типах осадочных, метаморфических и магматических пород, за исключением черных углеродистых сланцев, находятся на уровне кларковых его значений — средней распространенности в этих породах. Минимальная концентрация *Au* установлена в доломитах и известняках (0,4-0,6 мг/т), гнейсогранитах и лейкогранитах (0,7-0,8 мг/т), островодужных вулканитах (1,0-1,2 мг/т), чарнокитах и мигматитах (1,2-1,3 мг/т). Повышенные значения *Au* отмечены в двупироксеновых кристаллических сланцах (3,7 мг/т), высокожелезистых базитах (4-5,6 мг/т), пикробазальтах (8,5 мг/т), конгломератах и песчаниках (5,6-8,0 мг/т) базальной пестроцветной формации чингасанской серии. Максимальные содержания *Au* получены в черных углеродистых сланцах тейской

(12 мг/т) и сухопитской (7,8-20 мг/т) серий, рыбинской (10-60 мг/т) и панимбинской (18-20 мг/т) толщ. К многочисленным горизонтам углеродистых сланцев протерозоя приурочены золоторудные тела Главного золотоносного пояса. Являются ли они источником  $Au$ , геохимическим барьером для рудоносных глубинных флюидов или их комбинацией – не всегда ясно.

### **Геолого-геохимические предпосылки формирования золотого оруденения**

Все месторождения  $Au$  Северо-Енисейского кряжа сосредоточены в пределах ЦМП, в зоне влияния Татарско-Ишимбинской системы разломов и многократного проявления мезо- и неопротерозойского магматизма рифтогенного и внутриплитного типа [5]. Основные золоторудные месторождения, в том числе крупные – Олимпиада, Ведугинское, Советское, – размещены в углеродистых сланцах нижних свит мезопротерозоя, характеризующихся повышенной (5-10 до 60 мг/т) “фоновой” золотоносностью. Источником золота в них могли быть породные комплексы соседней Тунгусской гранит-зеленокаменной провинции. Попутнинское и ряд других месторождений и рудопроявлений золота находятся в осадочно-вулканогенных толщах Рыбинско-Панимбинского пояса с заметно повышенным (4-10 мг/т) содержанием  $Au$  в базитах и пикритах. Ведущие типы золотого оруденения – золото-кварцевый (месторождения Советское, Эльдорадо, Васильевское и др.), золото-сульфидный (Олимпиада, Благодатское, Ведугинское, Боголюбовское, Золотое, Попутнинское и др.), золото-сурьмяный (Удереysкое, Раздольнинское) [31]. На основе геохронологических исследований выявлена корреляция рубежей золотого и золото-уранового рудообразования с основными тектоно-магматическими событиями в регионе в позднем неопротерозое [5]. Образование кварцевожильных зон (месторождения Советское, Эльдорадо и др.) (820–830 млн лет) коррелирует с эпохой формирования шарьяжно-надвиговых структур [32]. Эпоха формирования золото-арсенопирит-кварцевых руд (775-820 млн лет) близка по времени заложения рифтогенных структур, формирования риодацитов (780 млн лет) Рыбинского участка. Образование золотосульфидных руд (711-720 млн лет) по времени совпадает с заложением и эволюцией рифтовых структур (Уволжский грабен) (700-720 млн лет), проявлением внутриплитного гранитоидного и щелочного магматизма (700-690 млн лет). Эпоха золото-сурьмяного оруденения сопряжена с этапом заложения приразломных грабенов и внедрением щелочно-ультраосновных и субщелочных гранитоидных интрузий (630-670 млн лет).

Для формирования золоторудных месторождений существенное значение имеют следующие геолого-геохимические предпосылки:

- 1) размещение месторождений в металлогеническом поясе между Ишимбинской и Татарской зонами разломов;
- 2) проявление основного магматизма в этих зонах на границе  $PR_1$  и  $PR_2$  (индыглинский комплекс) и в мезопротерозое с формированием в троговой структуре Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса с повышенным содержанием  $Au$  в базитах и пикритах;
- 3) стратиграфический и литологический контроль оруденения (терригенные и карбонатно-терригенные золотоносные углеродистые сланцы тейской и нижних свит сухопитской серии), развитого в троговой структуре и связанного с гидротермальными процессами этапов постколлизийного внутриплитного магматизма;
- 4) повышенные содержания  $Au$  в базитах, пикритах, кислых вулканитах  $K-Na$  типа и диоритах, черных углеродистых сланцах;

5) проявление коллизионного *K-Na* гранитоидного (~850 млн лет назад), внутриплитного и рифтогенного плюмового магматизма бимодального, субщелочного и щелочного типов на уровне 780, 750, 700 и 650 млн лет;

6) развитие рудообразующих и рудоконцентрирующих систем, формирующих экономически значимые месторождения.

### Выводы

Результаты исследования показывают, что Енисейский кряж как крупная золотоносная провинция не выделяется повышенным фоном по *Au*. Все месторождения золота сосредоточены в пределах единого Центрального металлогенического пояса, в котором имеются благоприятные геолого-геохимические предпосылки для формирования золотого и золото-уранового оруденения. Важнейшими из них являются: размещение месторождений между Татарским и Ишимбинским глубинными разломами в троговой структуре Рыбинско-Панимбинского пояса с повышенным содержанием *Au* в базитах, пикритоидах, углеродистых сланцах; повышенные содержания *Au* в черных углеродистых сланцах на разных стратиграфических уровнях тейской, сухопитской серий протерозоя, *U* и *Th* в гранитогнейсовых куполах, *Na-K* риолитах и субщелочных гранитах; проявление калий-натриевого гранитоидного (~850 млн лет назад) внутриплитного, рифтогенного плюмового магматизма на уровне 780, 750, 700 и 650 млн лет, приведшего к привносу, перераспределению и концентрации золота и урана; наличие геохимических ореолов *Zn*, *Pb*, *Ag*, *Au*, *Bi*, *As*, зон метасоматических изменений березитового, гумбеитового и кварц-гидрослюдисто-карбонатного типов; развитие рудообразующих и рудоконцентрирующих систем, формирующих экономически значимые месторождения.

*Работа выполнена за счет средств гранта РФФИ (проект № 21-77-20018).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Шахов Ф.Н. Основные направления научных исследований в золотоносных районах Сибири // Геология и геофизика. — 1961. — № 10. — С. 89-100.
- 2) Ножкин А.Д., Туркина О.М., Лиханов И.И., Дмитриева Н.В. Позднепалеопротерозойские вулканические ассоциации на юго-западе Сибирского кратона (Ангаро-Канский блок) // Геология и геофизика. — 2016. — Т. 57. — № 2. — С. 312-332.
- 3) Ножкин А.Д., Туркина О.М., Лиханов И.И., Савко К.А. Палеопротерозойские метавулканогенно-осадочные толщи енисейского метаморфического комплекса на юго-западе Сибирского кратона (Ангаро-Канский блок): расчленение, состав, *U-Pb* возраст цирконов // Геология и геофизика. — 2019. — Т. 60. — № 10. — С. 1384-1406.
- 4) Ножкин А.Д., Туркина О.М., Лиханов И.И. Позднепалеопротерозойские островодужные вулканические ассоциации в аккреционном поясе юго-западного обрамления Сибирского кратона (Предивинский терреин Енисейского кряжа) // Геохимия. — 2020. — Т. 65. — № 9. — С. 861-885.
- 5) Ножкин А.Д., Борисенко А.С., Неволько П.А. Этапы магматизма и рубежи золотого оруденения Енисейского кряжа // Геология и геофизика. — 2011. — Т. 52. — № 1. — С. 158-181.
- 6) *Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Khiller V.V. Neoproterozoic metamorphic evolution in the Transangarian Yenisei Ridge: evidence from monazite and xenotime geochronology // Doklady Earth Sciences. — 2013. — V. 450. — No. 1. — P. 556-561.*
- 7) *Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Zinoviev S.V., Khiller V.V. P-T-t reconstructions of South Yenisei Ridge metamorphic history (Siberian Craton): petrological consequences and*



- application to supercontinental cycles // Russian Geology and Geophysics. – 2015. – V. 56. – P. 805-824.*
- 8) Лиханов И.И., Зиновьев С.В., Козлов П.С. Бластомилонитовые комплексы западной части Енисейского кряжа (Восточная Сибирь, Россия): геологическая позиция, эволюция метаморфизма и геодинамические модели // Геотектоника. – 2021. – Т. 55. – № 1. – С. 41-65.
- 9) *Likhanov I. I., Polyanskii O. P., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Vershinin A. E., Krebs M., Memmi I. Metamorphic evolution of high-alumina metapelites near the Panimba overthrust (Yenisei Range): mineral associations, P-T conditions, and tectonic model // Russian Geology and Geophysics. – 2001. – V. 42. – No. 8. – P. 1205-1220.*
- 10) *Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Vershinin A.E. The Teya polymetamorphic complex in the Transangarian Yenisei Ridge: an example of metamorphic superimposed zoning of low- and medium-pressure facies series // Doklady Earth Sciences. – 2011. – V. 436. – No. 2. – P. 213-218.*
- 11) *Likhanov I.I., Nozhkin A.D., Savko K.A. Accretionary tectonics of rock complexes in the western margin of the Siberian Craton // Geotectonics. – 2018. – V. 52. – No. 1. – P. 22-44.*
- 12) *Likhanov I.I., Nozhkin A.D., Reverdatto V.V., Krylov A.A., Kozlov P.S., Khiller V.V. Metamorphic evolution of ultrahigh-temperature Fe- and Al-rich granulites in the South Yenisei Ridge and tectonic implications // Petrology. – 2016. – V. 24. – No. 4. – P. 392-408.*
- 13) *Likhanov I.I., Polyansky O.P., Reverdatto V.V., Memmi I. Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, eastern Siberia // Journal of Metamorphic Geology. – 2004. – V. 22. – P. 743-762.*
- 14) Ножкин А.Д., Туркина О.М. Геохимия гранулитов канского и шарыжалгайского комплексов. Новосибирск: Изд-во ОИГГМ СО РАН. – 1993. – 221 с.
- 15) Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Попов Н.В. Коллизионный метаморфизм докембрийских комплексов в заангарской части Енисейского кряжа // Петрология. – 2008. – Т. 16. – № 2. – С. 148-173.
- 16) *Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Zinov'ev S.V., Nozhkin A.D. Age of blastomylonites of the Yenisei regional shear zone as evidence of the Vendian accretionary-collision events at the western margin of the Siberian Craton // Doklady Earth Sciences. – 2013. – V. 450. – No. 1. – P. 489-493.*
- 17) Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Вершинин А.Е. Геохимические свидетельства природы протолита железисто-глиноземистых метапелитов Кузнецкого Алатау и Енисейского кряжа // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 1. – С. 119-131.
- 18) *Likhanov I.I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of Yenisei Ridge, Siberia // Geological Society, London, Special Publications. – 2019. – V. 478. – P. 98-115.*
- 19) *Likhanov I.I., Santosh M. The “triple point” paradigm of aluminosilicates revisited // Geological Journal. – 2020. – V. 55(6). – P. 4772-4789.*
- 20) *Likhanov I.I. Metamorphic indicators for collision, extension and shear zones geodynamic settings of the Earth's crust // Petrology. – 2020. – V. 28. – No. 1. – Pp. 1-16.*
- 21) *Likhanov I.I., Santosh M. A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // Precambrian Research. – 2019. – V. 328. – P. 128-145.*
- 22) *Likhanov I.I., Régnier J.-L., Santosh M. Blueschist facies fault tectonites from the western margin of the Siberian Craton: Implications for subduction and exhumation associated with early stages of the Paleo-Asian Ocean // Lithos. – 2018. – V. 304-307. – P. 468-488.*

- 23) Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Зиновьев С.В. Неопротерозойский дайковый пояс Заангарья Енисейского кряжа как индикатор процессов растяжения и распада Родинии // Доклады Академии наук. — 2013. — Т. 450. — № 6. — С. 685-690.
- 24) Лиханов И.И., Ревердатто В.В. Неопротерозойские комплексы-индикаторы континентального рифтогенеза как свидетельство процессов распада Родинии на западной окраине Сибирского кратона // Геохимия. — 2015. — Т. 53. — № 8. — С. 675-694.
- 25) Ножкин А.Д., Туркина О.М., Баянова Т.Б. и др. Неопротерозойский рифтогенный и внутриплитный магматизм Енисейского кряжа как индикатор процессов распада Родинии // Геология и геофизика. — 2008. — № 7. — С. 666-689.
- 26) Ножкин А.Д., Ревердатто В.В. Неопротерозойские редкометальные субщелочные лейкограниты Енисейского кряжа // Доклады Академии наук. — 2018. — Т. 480. — № 3. — С. 315-321.
- 27) Верниковский В.А., Верниковская А.В. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа // Геология и геофизика. — 2006. — Т. 47. — № 1. — С. 35-52.
- 28) Лиханов И.И., Ножкин А.Д., Ревердатто В.В., Козлов П.С. Гренвильские тектонические события и эволюция Енисейского кряжа, западная окраина Сибирского кратона // Геотектоника. — 2014. — Т. 48. — № 5. — С. 32-53.
- 29) Лиханов И.И. Свидетельства гренвильских и вальгальских тектонических событий на западной окраине Сибирского кратона (Гаревский метаморфический комплекс, Енисейский кряж) // Петрология. — 2023. — Т. 31. — № 1. — С. 49-80.
- 30) Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Ножкин А.Д., Козлов П.С. Свидетельства гренвильских и вальгальских тектонических событий на западной окраине Сибирского кратона (Ангарский комплекс, Енисейский кряж) // Геосферные исследования. — 2024. — № 2. — С. 6-36.
- 31) Ножкин А.Д., Лиханов И.И. Золото в породах докембрия Енисейского кряжа и геолого-геохимические предпосылки формирования золотого оруденения в Центральном металлогеническом поясе региона // Геосферные исследования. — 2023. — № 2. — С. 49-70.
- 32) Likhanov I.I., Kozlov P.S., Polyansky O.P., Popov N.V., Reverdatto V.V., Travin A.V., Verschinin A.E. Neoproterozoic age of collisional metamorphism in the Transangara Yenisey Ridge (Based on  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  data) // Doklady Earth Sciences. — 2007. — V. 413. — No. 1. — P. 234-237.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ И ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Нурканов Е.Ю., Петров М.С., Гусев А.О., Кадушников Р.М.

ООО «СИАМС», УрФУ, г. Екатеринбург

nurkanov@siams.com

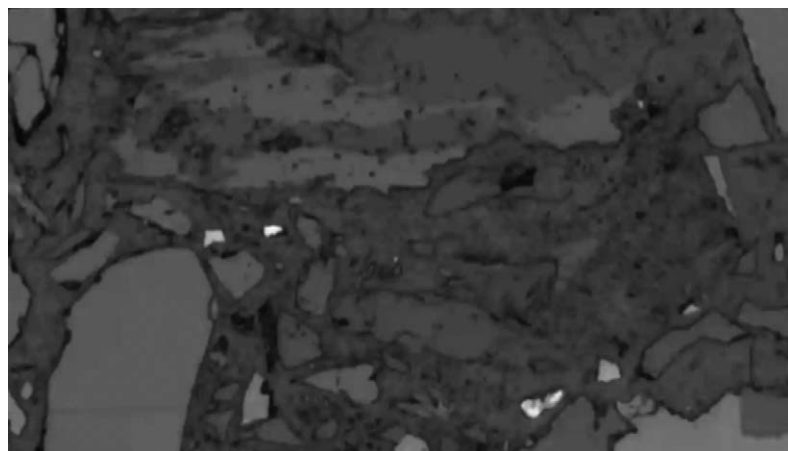
Микроскопия служит базовым инструментом для задач петрографии, минераграфии и минералогии, связанных с описательными, полуколичественными, количественными исследованиями структуры и вещественного состава горных пород и минерального сырья. Метод количественного исследования с использованием оптических или растровых электронных микроскопов именуется оптико-геометрическим [1].

В силу большей доступности метод оптико-геометрического анализа с использованием оптической микроскопии является более распространенным, но имеет ограничения физического характера в части разрешающей способности оптических систем и оптических свойств минералов в образцах для оптической микроскопии, таких, как аншлифы, петрографические шлифы и полированные шашки (брикеты) (рис. 1).

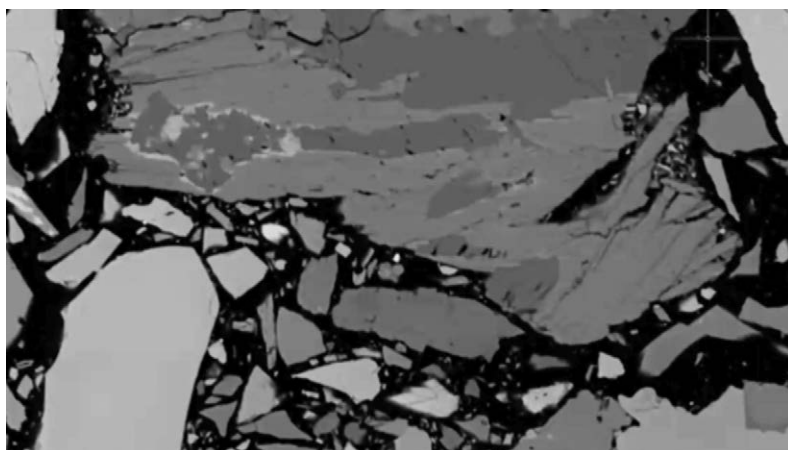
Большинство исследований с использованием оптической микроскопии сталкивается с необходимостью давать оценку горной породе или минеральному сырью с учетом присутствия в образцах как рудных, так и нерудных минералов. Рудные минералы обладают высокой отражательной способностью ( $K > 20\%$ ) и контрастными оптическими свойствами, что облегчает задачу сегментирования (выделения) рудных минералов на цифровых изображениях каноническими методами анализа изображений с помощью пороговых функций контрастирования, фильтрации и сегментации (объединения) пикселей с одинаковыми цвето-яркостными характеристиками [2]. В то же время нерудные минералы обладают низкой отражательной способностью ( $K < 4\%$ ) и контрастностью, что затрудняет их анализ в отраженном свете. Проблема решается методами поляризационного контраста в проходящем свете, но для применения данного метода необходимо изготовление петрографических прозрачных шлифов, что требует специального оборудования и тем самым ограничивает применимость метода.

Для того, чтобы в ряде допустимых случаев можно было обойтись без изготовления петрографических шлифов, ООО «СИАМС» предлагается технология глубокого машинного обучения для сегментации (выделения) нерудных и слабоконтрастных минералов в отраженном свете. Данная технология была опробована на образцах сульфидных руд с высоким содержанием нерудных минералов и образцах нефелин-апатитовой руды.

В частности, для случая нефелин-апатитового продукта (рис. 2А) была использована сверточная нейросеть типа *image segmentation*, которая была обучена на обучающей выборке из 20 изображений (2480 x 2000 пикс.) с размеченными зернами нефелина. Разметка производилась в специализированном ПО «Минерал С7» [3]. Затем запуск обученной нейросети был встроен в ПО «Минерал С7» как дополнительный этап сегментирования (выделения) нефелина в свободных зернах и сростках. Таким образом, в несколько раз



А. Изображение в отраженном свете  
(оптическая микроскопия)



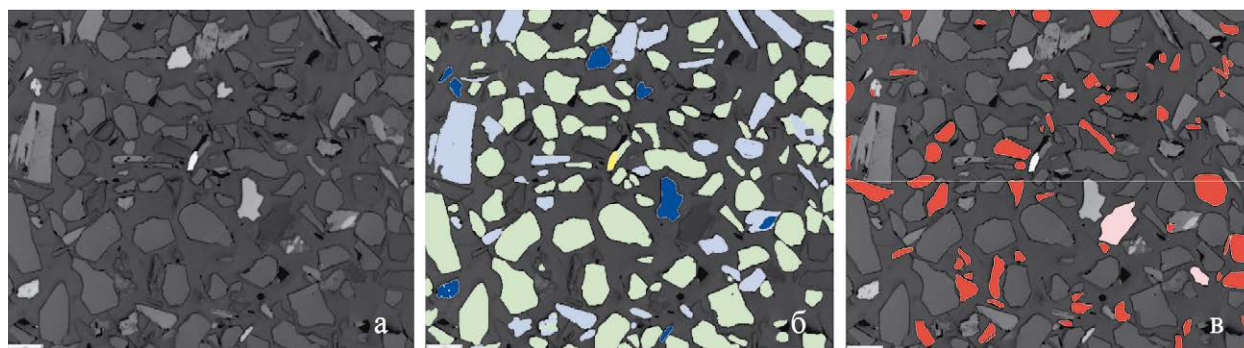
Б. Изображение в обратно-  
рассеянных электронах *BSE*  
(электронная микроскопия)

Рис. 1. Изображения участка полированного брикета нефелин-апатитового концентрата, полученные различными методами микроскопии

повысилась производительность количественного анализа, поскольку нефелин, не выделяемый каноническим способом (рис. 2Б), с минимальными потерями выделяется обученной нейросетью в ПО «Минерал С7» (рис. 2В).

В тех случаях, когда необходим петрографический анализ нерудных минералов в скрещенных николях, также возможно применение нейросетей, но в этом случае глубокое машинное обучение кратно усложняется за счет увеличения входных переменных параметров. В частности, каждая точка изображения шлифа в процессе вращения столика, либо скрещенных николей, претерпевает гармоническое изменение яркостных характеристик. Эти изменения можно описать гармонической функцией с аргументами: амплитуда, фаза и смещение фазы. Группируя точки изображения с одинаковыми значениями аргументов гармонической функции, можно сегментировать зерна и включения одного общего минералогического состава (рис. 3).

Для автоматизации петрографического анализа ООО «СИАМС» предлагается использовать автоматическую систему вращения скрещенных николей с управлением из ПО «Минерал С7». Данная система способна автоматически формировать стэк из 89 изображений поля зрения с шагом в 1 градус или иным программно-заданным шагом угла поворота николей. Для каждой точки этого стэка в ПО «Минерал С7» можно построить график поведения пиксела в каждой точке и, если этот пиксел изменяется по гармоническому закону – восстановить параметры этого гармонического закона.

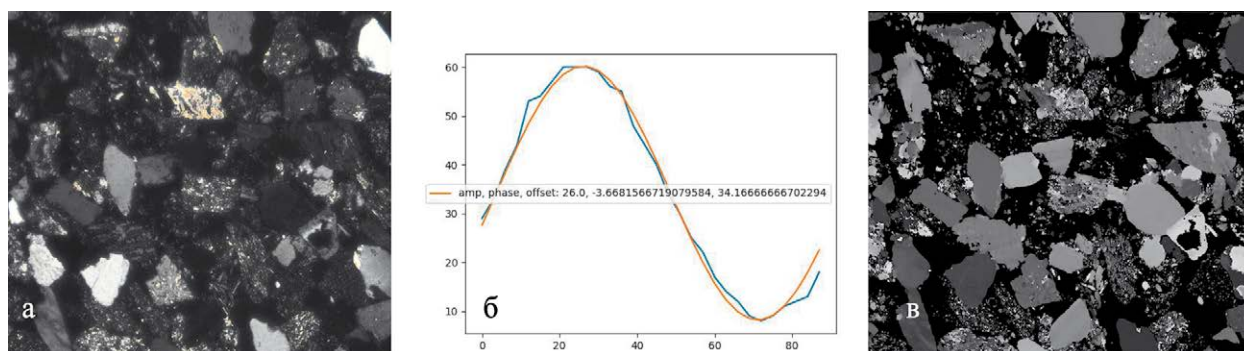


А. Исходное изображение нефелин-апатитового сырья

Б. Применение пороговой сегментации зерен (апатит, титанит, эгирин)

В. Применение обученной нейросети, семантическая сегментация (нефелин)

Рис. 2. Сегментация зерен минералов на брикете в ПО «Минерал С7» на оптических изображениях



А. Исходное изображение в скрещенных николях (угол поворота 50°)

Б. Гармоническая функция изменения яркостных характеристик точки на шлифе

В. Карта зерен, сегментированных по значению фазы (аргументу гармонической функции)

Рис. 3. Сегментация зерен минералов на шлифе в ПО «Минерал С7» по аргументам гармонической функции

С использованием предлагаемой технологии в перспективе предполагается создание системы для программно-аппаратного определения угла погасания и диагностики типа минерала по этому признаку.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Технологические аспекты рационального недропользования: роль технологической оценки в развитии и управлении минерально-сырьевой базой страны / Т.В. Башлыкова, Г.А. Пахомова, Б.С. Лагов и др. Под науч. ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСИС. – 2005. – 576 стр.
- 2) Алгоритмические методы сегментации изображений. Учебное пособие / Д.Н. Тумаков, З.Д. Каюмов, А.А. Егорчев, И.И. Латыпов. КФУ, 2023. – 40 с. [URL://kpfu.ru/portal/docs/F265768322/Algoritmicheskie.metody.segmentacii.izobrazhenii\\_.pdf](http://kpfu.ru/portal/docs/F265768322/Algoritmicheskie.metody.segmentacii.izobrazhenii_.pdf)
- 3) Руководство пользователя ПО «Минерал С7». ООО «СИАМС». – 48 с.

УДК 553.63 : [549+552] (476)

## ПРОГНОЗНО-МИНЕРАГЕНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ КАЛИЕНОСНОЙ СУБФОРМАЦИИ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭФФЕКТИВНОГО ОСВОЕНИЯ РЕСУРСОВ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Петрова Н.С., Денисова Н.Ю., Глаз Н.В.

Государственное предприятие «НПЦ по геологии», филиал «Институт геологии»  
г. Минск, Республика Беларусь

Припятский калиеносный бассейн входит в состав Восточно-Европейской соленосной провинции, контролируется Припятским прогибом — палеорифтом деструктивно-дивергентной группы (рис. 1) с единым структурно-вещественным комплексом, включающим девонские галогенные формации хлоридного вещественно-генетического типа [2, 3]. Специфическими особенностями калийного рудогенеза в Припятском прогибе — одном из крупнейших в мире бассейнов, являются многообразие калиепроявлений разного масштаба и типов, сочетание в одном разрезе калийных руд разных гиперсоляных ассоциаций — красноцветной и пестроцветной (рис. 2).

Наибольшее количество калийных горизонтов, имеющих, как правило, максимальную мощность, приурочено к областям наиболее интенсивного устойчивого прогибания в погруженных частях структур. На активно формировавшихся конседиментационных возвышенностях калийные соли либо не накапливались, либо формировались в непромышленном масштабе (рис. 3). Приуроченность максимального калиенакопления к наиболее погруженным частям территории с некоторым смещением в плане сформулировано в виде концепции «пространственно-временного консерватизма» и используется в практике геологоразведочных работ при прогнозе размещения калийных залежей.

При детальном анализе обнаруживается значительная, а иногда и определяющая связь с положением в пространстве и разрезе соленосной формации, а также важная роль в формировании таких факторов, как эволюция вторичных процессов, нередко связанных с флюидогеодинмикой. Значение исследований по оценке конкретных связей

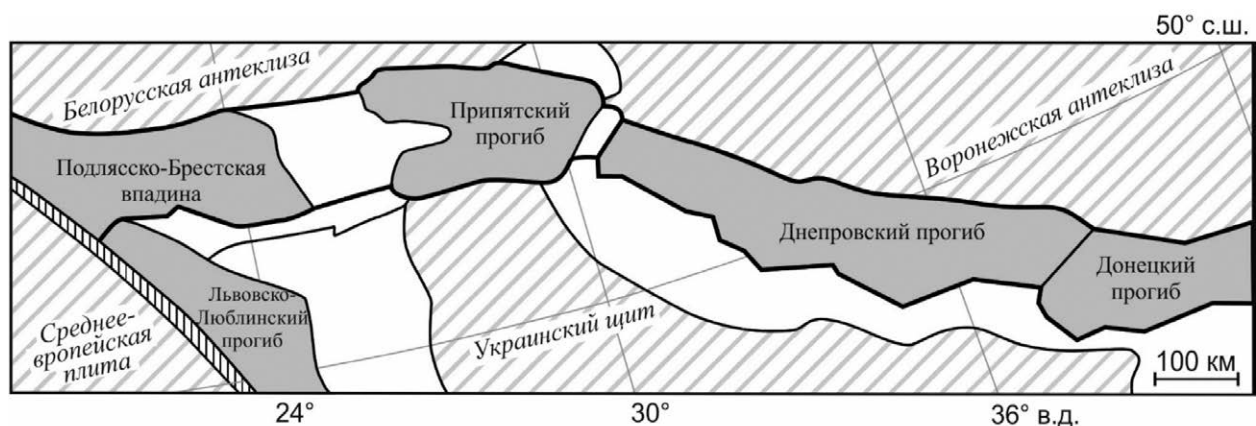
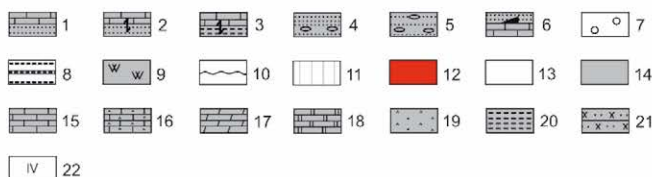


Рис. 1. Схема тектонического районирования юго-запада Восточно-Европейского кратона [1]

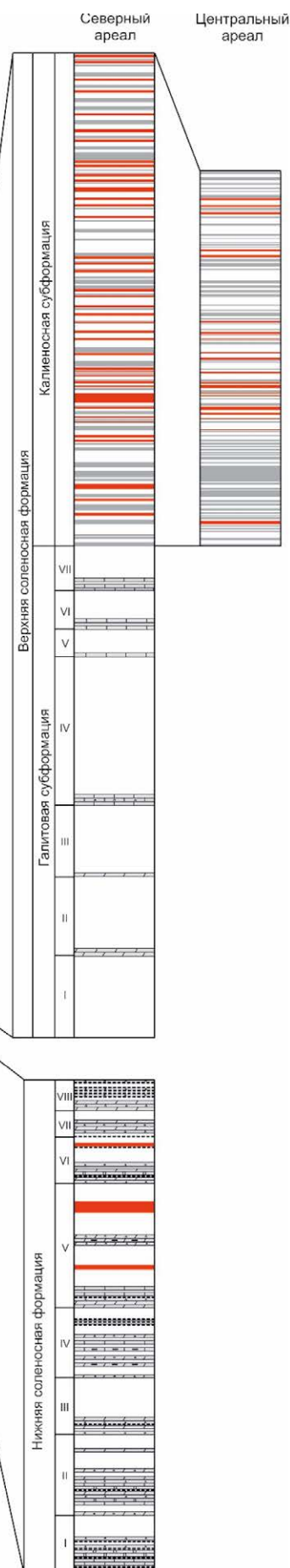


Рис. 2. Геологический разрез осадочного чехла Припятского прогиба [4]

| Система         | Отдел            | Ярус         | Геологические события                                                                                                        | Формации | Мас. мощность формации, м | Характеристика формации                                                                                                                                |
|-----------------|------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Триасовая       | T <sub>1-2</sub> |              | Формирование пострифтовых молассоидов                                                                                        |          | 1375                      | Терригенные пестроцветные молассоиды                                                                                                                   |
| Пермская        | P <sub>2</sub>   | Татарский    | Тангенциальное сжатие, поднятие и эрозия. Пострифтовое осадконакопление в изолированных прислоненных компенсационных мульдах |          |                           |                                                                                                                                                        |
|                 |                  | Казанский    |                                                                                                                              |          |                           |                                                                                                                                                        |
|                 |                  | Уфимский     |                                                                                                                              |          |                           |                                                                                                                                                        |
|                 |                  | Кунгурский   |                                                                                                                              |          |                           |                                                                                                                                                        |
|                 |                  | Артинский    |                                                                                                                              |          |                           |                                                                                                                                                        |
| Пермская        | P <sub>1</sub>   | Сакмарский   |                                                                                                                              |          | 785                       | Соленосная сульфатно-хлоридная                                                                                                                         |
|                 |                  | Асесельский  |                                                                                                                              |          | 55                        | Терригенно-карбонатная                                                                                                                                 |
|                 |                  | Гжельский    |                                                                                                                              |          |                           |                                                                                                                                                        |
|                 | C <sub>2</sub>   | Касимовский  |                                                                                                                              |          |                           |                                                                                                                                                        |
|                 | C <sub>2</sub>   | Московский   |                                                                                                                              |          | 367                       | Карбонатно-терригенная                                                                                                                                 |
| Каменноугольная | C <sub>2</sub>   | Башкирский   | Поднятая фаза (неоднократная смена континентального и мелководного морского осадконакопления)                                |          | 246                       | Паралические карбонатно-терригенные угленосные пестроцветные                                                                                           |
|                 |                  | Серпуховский |                                                                                                                              |          | 186                       | Сероцветная                                                                                                                                            |
|                 |                  | Визейский    |                                                                                                                              |          | 400                       | Терригенная каолиново-угленосная                                                                                                                       |
|                 | C <sub>1</sub>   | Турнейский   |                                                                                                                              |          | 170                       | Карбонатно-терригенная                                                                                                                                 |
|                 |                  | Фаменский    |                                                                                                                              |          | 1600                      | Сероцветные надсолевая карбонатно-терригенная сланцевая, сульфатноосная, верхняя соленосная, вулканиты щелочно-ультраосновные до щелочно-базальтоидных |
| Девонская       | D <sub>3</sub>   | Франский     | Главная фаза                                                                                                                 |          | 1400/3000                 | Терригенно-сульфатно-карбонатная (межсолевая)                                                                                                          |
|                 |                  |              |                                                                                                                              |          | 1350                      | Нижняя соленосная, вулканиты щелочно-базальтоидного состава                                                                                            |
|                 |                  |              | Начальная фаза                                                                                                               |          | 1900                      | Доломиты-известково-мергельные, сульфатноосные                                                                                                         |
|                 |                  |              |                                                                                                                              |          | 320                       | Терригенно-карбонатные                                                                                                                                 |
|                 |                  |              | Предрифтовое растяжение и опускание, обособление прогиба                                                                     |          | 90                        | Терригенно-карбонатные                                                                                                                                 |
|                 |                  |              |                                                                                                                              |          | 220                       | Терригенно-карбонатные                                                                                                                                 |
|                 | D <sub>2</sub>   | Живетский    | Тангенциальное сжатие, поднятие и эрозия                                                                                     |          |                           |                                                                                                                                                        |
|                 |                  | Эйфельский   |                                                                                                                              |          |                           |                                                                                                                                                        |
|                 |                  | Эмский       |                                                                                                                              |          |                           |                                                                                                                                                        |
|                 | D <sub>1</sub>   | Правский     |                                                                                                                              |          |                           |                                                                                                                                                        |
|                 |                  | Лохковский   |                                                                                                                              |          |                           |                                                                                                                                                        |



Буквы обозначают цвет пород: Пц - пестроцветная, Сц - сероцветная



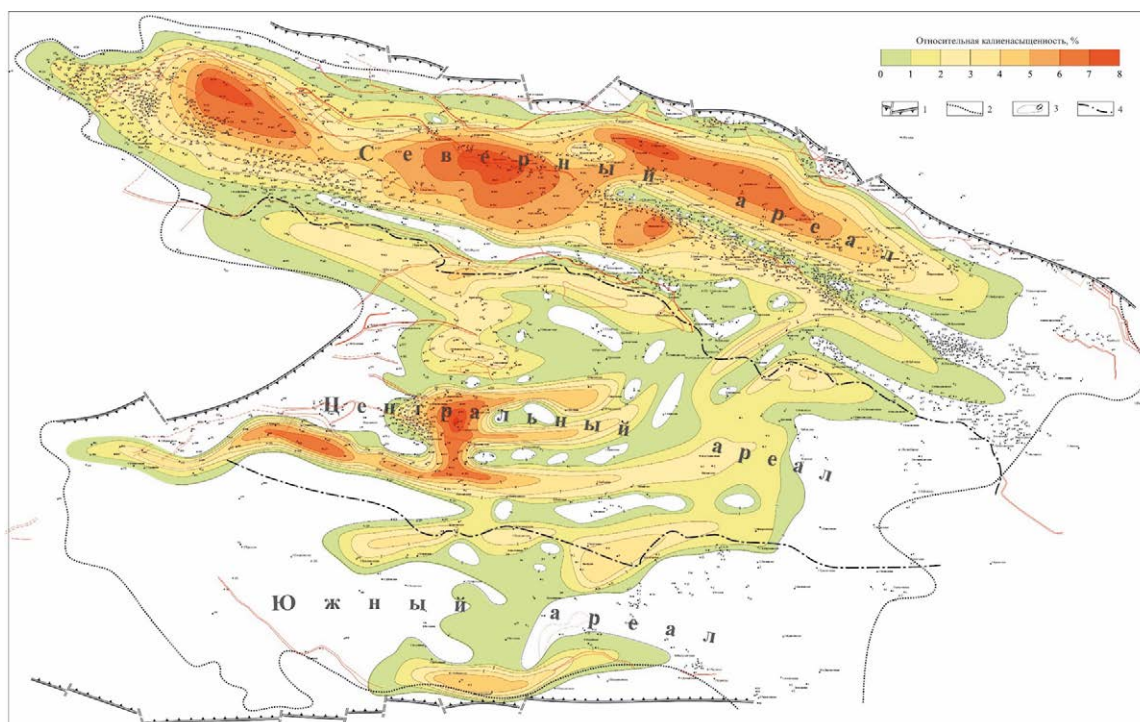


Рис. 3. Схематическая карта относительной калиенасыщенности разреза средне-верхнефаменской калиеносной субформации Припятского прогиба

1 — разломы, 2 — контур верхнефаменской галогенной формации, 3 — изолинии относительной калиенасыщенности (отношение суммарной мощности калиеносных горизонтов к мощности субформации, %), 4 — граница структурных ареалов [4]

залежей с определенными частями разреза субформации или калийного горизонта возрастает с разработкой новых территорий, на которых меняется тип калийных руд.

Минерагенические факторы, отражающие закономерности размещения калийных залежей, выявляются путем установления статистически устойчивых связей тех или иных элементов геологического строения. По методам выявления и изучения они подразделяются на наблюдаемые и моделированные. Наблюдаемые факторы по своей геологической природе подразделяются на седиментационные, фациально-литологические, структурные, геоморфологические [2]. Среди моделированных факторов выделяются геодинамические, палеогеографические, палеогидрогеологические и др. Особое значение среди них имеют палеогеодинамические обстановки, определяющие минерагеническую зональность и локализацию оруденения. В процессе выполнения научно-исследовательских работ были определены фациально-литологические условия, благоприятные для локализации скоплений полезного ископаемого, а среди структурных факторов выделены дизъюнктивные, пликативные структуры разных порядков, а также частные характеристики и элементы структурных форм, определяющие размещение минерального сырья [4].

Достоверность прогноза предопределяется степенью изученности территории, надежностью оценочных параметров и точностью расчетных формул, в совокупности достаточных или недостаточных для однозначных оценок.

*Оценочные параметры* — совокупность обоснованных аналогий и (или), реже, экономически предельными требованиями промышленности к качеству и количеству руд и горно-

техническим условиям их добычи, при которых обеспечиваются оптимальный вариант локализации и количественной оценки прогнозных ресурсов, принятие объективного решения о целесообразности и очередности продолжения геологоразведочных работ с целью повышения геологической изученности недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы.

По *степени изученности* оцениваемая территория Припятского прогиба подразделяется на группы:

- *хорошо изученные*, где уже пробурено то или иное количество поисковых и разведочных скважин на калийные соли, довольно равномерно размещенных по всей площади или значительной ее части, причем керн этих скважин опробован, промышленные кондиции разработаны;
- *изученные*, где такие скважины пробурены в пределах отдельных разобщенных участков и кое-где в других районах, промышленные кондиции обычно разработаны;
- *слабо изученные*, где поисковые и разведочные скважины либо отсутствуют, либо являются единичными, либо пробурены в небольшом количестве в пределах немногих участков, промышленные кондиции не разработаны.

Прогнозная оценка площадей представлена в ранжированном выражении и включает шесть градаций *степени перспективности* для шахтной<sup>1</sup> разработки с учетом экспертной оценки степени сходства прогнозируемого объекта с эталонной моделью (табл. 1):

- *промышленно калиеносные*, в пределах которых имеются эксплуатируемые и разведанные промышленные месторождения. Прогнозные ресурсы месторождений относятся к I группе, подсчитываются по разведанным частям путем выявления в их пределах (более глубокие горизонты, недостаточно изученные участки) и на флангах новых рудных тел. Прогнозные запасы по остальной площади относятся ко II группе прогнозных ресурсов;
- *высокоперспективные*, в пределах которых имеются разведанные (или разведываемые) промышленные месторождения либо залежи калийных солей мощностью не менее 1,5 м на глубинах не более 1000-1200 м. В зависимости от степени изученности таких территорий и их калиеносности определяются прогнозные запасы либо всех трех групп, либо II и III групп, либо только III группы;
- *перспективные*, в пределах которых на глубинах не более 1000-1200 м установлены калиепроявления (прослои калийных солей) мощностью менее 1,5 м и другими показателями возможной промышленной калиеносности. Для таких территорий определяются прогнозные запасы III группы;
- *малоперспективные*, в пределах которых соляная толща содержит редкие, преимущественно незначительные калиепроявления и прослои калийных солей мощностью в несколько десятков сантиметров, или отвечают требованиям кондиций по мощности и качеству, но залегают на глубине более 1200 м или содержат повышенные концентрации вредных примесей, или являются возможно калиеносными в непромышленных масштабах по другим показателям;
- *с невыясненной перспективой*, в пределах которых развиты отложения, не обладающие пока ни прямыми, ни косвенными признаками калиеносности, однако являющиеся возможно перспективными по другим показателям;
- *бесперспективные*, в пределах которых практически отсутствуют поисковые признаки и минерагенические факторы калиеносности, по всем известным оценочным параметрам калиеносность не установлена и не предполагается.

<sup>1</sup> 1,5 м мощность, глубина вскрытия шахтой не более 1200 м.

Таблица 1. Категории площадей и участков по степени перспективности

| Перспективность             | Критерии рудоносности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Прогнозно-поисковая изученность                               |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Промышленно калиеносные     | Эксплуатируемые и подготовленные к разработке объекты полезных ископаемых; определившиеся границы рудоносных площадей (участков) с оцененным промышленным потенциалом, в пределах которых имеются эксплуатируемые и разведанные промышленные месторождения. Прогнозные ресурсы последних относятся к I группе. Они подсчитываются по разведанным частям месторождений путем выявления на их флангах и в их пределах (более глубокие горизонты, недостаточно изученные участки) новых рудных тел. Прогнозные запасы по остальной площади относятся ко II группе                                     | Достаточно (для оценки) изучены с поверхности и на глубину    |
| Высоко-перспективные        | Прямые признаки промышленного оруденения – наличие объектов полезных ископаемых и их прямых поисковых признаков; практически определившиеся границы рудоносных площадей (участков) с очевидным промышленным потенциалом, в пределах которых имеются разведанные или разведываемые промышленные месторождения либо залежи калийных солей мощностью не менее 1,5 м на глубинах не свыше 1000 (1200) м. Для таких территорий, в зависимости от степени изученности месторождений и их калиеносности, определяются прогнозные запасы либо всех трех групп, либо II и III групп, либо только III группы | Недоизучены, главным образом на глубину                       |
| Перспективные               | Косвенные поисковые признаки калиеносности, отдельные прямые признаки оруденения (калиепроявления и др.); недостаточно определившиеся или неопределившиеся границы калиеносных площадей (участков), в пределах которых на глубинах не более 1000 (1200) м установлены калиепроявления (прослои калийных солей) мощностью менее 1,5 м и другими показателями возможной промышленной калиеносности. Для таких территорий определяются прогнозные запасы III группы                                                                                                                                   | Недостаточно изучены с поверхности и слабо изучены на глубину |
| Мало-перспективные          | Соляная толща содержит редкие, преимущественно незначительные калиепроявления и прослои калийных солей мощностью не более нескольких десятков сантиметров либо является возможно калиеносной в непромышленных масштабах по другим показателям, в пределах которых соляная толща содержит редкие, преимущественно незначительные калиепроявления и прослои калийных солей мощностью не более нескольких десятков сантиметров, либо является возможно калиеносной в непромышленных масштабах по другим показателям                                                                                   | Недостаточно изучены с поверхности и на глубину               |
| С невыясненной перспективой | Минерагенические факторы, основанные на палеореконструкциях, геолого-тектоническом или геодинамическом моделировании и т.д.; редкие косвенные и прямые поисковые признаки; границы потенциально калиеносных площадей плохо контурируются, в пределах которых развиты отложения, не обладающие пока ни прямыми, ни косвенными признаками калиеносности, являющиеся, однако, возможно перспективными по другим показателям                                                                                                                                                                           | Слабо изучены с поверхности и на глубину                      |
| Бесперспективные            | Практически отсутствуют поисковые признаки и минерагенические факторы калиеносности; по всем известным оценочным параметрам калиеносность не установлена и не предполагается                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Достаточно изучены с поверхности и на глубину                 |

При прогнозно-минерагеническом районировании среднего масштаба *по размерам и форме площади* перспективных (калиеносных) территорий выделены следующие пространственные прогнозно-минерагенические или минерагенические категории:

- *поисковая площадь* — структурно обособленный участок земной поверхности, характеризующийся специфическим составом и строением, обнаруживающий признаки промышленной калиеносности и выделяемый для дальнейшего проведения геологосъемочных или поисковых работ;

- *перспективный участок* — структурно обособленная часть рудного (калиеносного) поля, характеризующаяся специфическим составом и строением вмещающих пород на уровне фаций и субфаций, содержащая признаки промышленного оруденения и расцениваемая как потенциальное месторождение. Участки выделяются и оконтуриваются с использованием прямых признаков локализации оруденения и типовых моделей месторождений. Выделение по геологической ситуации основано на приуроченности калиепроявлений к определенным геологическим обстановкам. При определении размера перспективных (калиеносных) территорий важнейшим действием является оконтуривание объектов прогноза с выделением естественных и искусственных границ.

Оценка прогнозных ресурсов производится на месторождениях, перспективных площадях и проявлениях, оконтуриваемых при прогнозных (прогнозно-минерагенических) исследованиях, как правило, без пространственной геометризации тел полезного ископаемого на картах, планах и разрезах. Набор прогнозных факторов зависит от детальности прогнозно-минерагенических исследований, выражающейся в ранге перспективных площадей.

Задача выделения перспективных площадей в наиболее общем случае заключается в оценке геологической ситуации частей геологического пространства, в пределах которых возможно обнаружение рудопроявлений калийных солей разного ранга. Разведанные и предварительно оцененные запасы подсчитываются в пределах геометризованных контуров тел полезного ископаемого.

В полном цикле комплексного освоения месторождений калийных солей весьма актуальную задачу представляет обоснование требований к качеству вовлекаемых в эксплуатацию калийных руд. Изученность калийных горизонтов по качеству минерального сырья нередко остается крайне неравнозначной. Иногда горизонты выявлены по каротажу в роторных скважинах и не охарактеризованы керном, характеристики их качества отсутствуют.

По *практической значимости калийных залежей* различают: промышленные эксплуатируемые в настоящее время горизонты; горизонты, по которым утверждены запасы по категориям  $C_1$  и  $C_2$ ; калийные залежи, отвечающие основным показателям кондиций (резерв горно-химической промышленности Беларуси) [4]. При определении масштабности месторождений, степень изученности которых соответствует оценочной стадии, результаты количественной оценки обычно включают приведенный потенциал (запасы категории  $C_2$  и ресурсы категории  $P_1$ ) к промышленным категориям (с использованием переводных коэффициентов для категории  $C_2$  — 0,8, для ресурсов  $P_1$  — 0,5;  $P_2$  — 0,3), а также сведений о категории оцененного потенциала, его величине и глубине прогноза.

В соответствии со степенью изученности калийных горизонтов и масштабности их развития в пределах рассматриваемых территорий несколько различаются в методическом плане описание и аналитическая оценка выделенных групп. В группе *промыш-*



ленных эксплуатируемых в настоящее время горизонтов по данным промыслово-геофизических исследований и результатам химических анализов уточняется выделение продуктивных слоев и пластов, детально рассматриваются их качественные параметры по всем опробованным скважинам. В группе *высокоперспективных* территорий, в пределах которых по отдельным горизонтам утверждены запасы категорий  $C_1+C_2$  и  $C_2$  или выявлены продуктивные пласты, удовлетворяющие современным требованиям промышленности, а прогнозные запасы превышают 500 млн т сырых солей, отмечаются изменения в строении и качественном составе продуктивных элементов калийных горизонтов, а также структуры их изменчивости по площади распространения, требующие обязательного уточнения [4]. В группе *перспективных* территорий, в пределах которых в калийных горизонтах выделяются продуктивные пласты сравнительно небольшой мощности с прогнозными запасами, как правило, 100-500 млн т, при описании отмечаются изменения в строении и составе продуктивных элементов горизонта.

Среднемасштабное прогнозно-минерагеническое районирование на калийные соли (масштаб 1:200 000) Припятского прогиба проведено по состоянию на 01.01.2021 г. и основано на структурно-формационном анализе девонской (средневерхнефаменской) соленосной формации с использованием генерализованного районирования геологического пространства оцениваемой территории. Картосхема сформирована на основе комплексирования геолого-геофизических материалов, полученных с учетом применения геологических, геофизических и структурно-вещественных методов (рис. 4).

В процессе проведения среднемасштабного прогнозно-минерагенического районирования на калийные соли (масштаб 1:200 000) для обеспечения последующего выхода на крупномасштабное прогнозирование уточнены границы размещения полезных ископаемых, установлена геологическая природа выявленных аномалий, приведена предварительная оценка прогнозных ресурсов в пределах перспективных площадей.

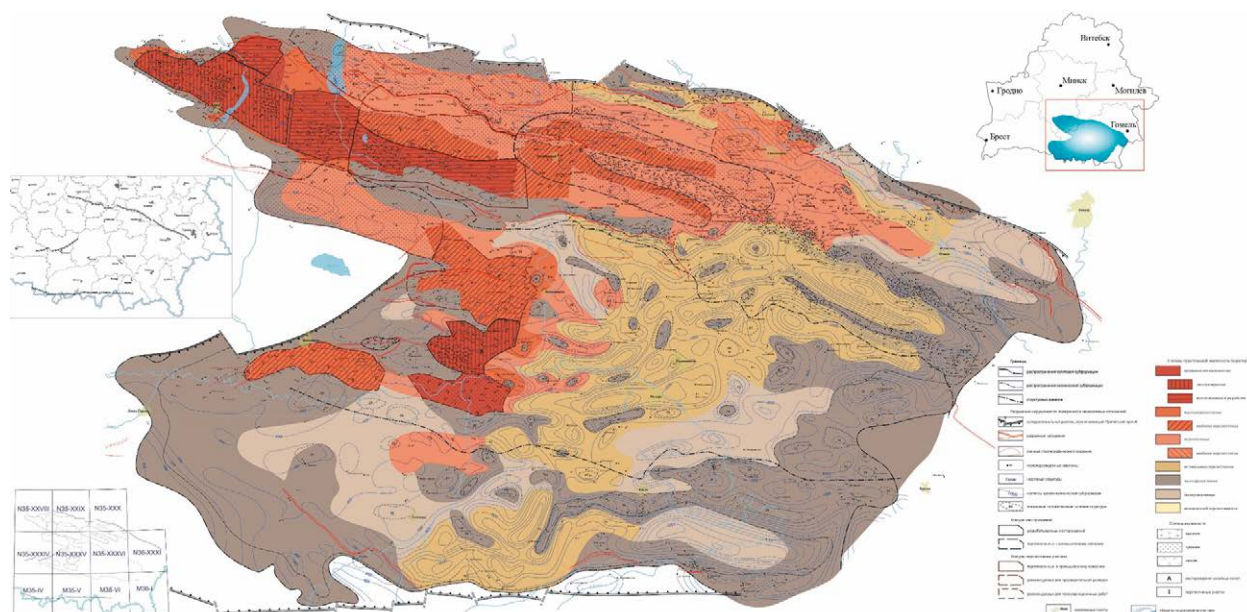


Рис. 4. Схема прогнозно-минерагенического районирования территории Припятского прогиба с оценкой его калиеносности (по состоянию на 01.01.2021)



Построение заключалось в последовательном выполнении следующих операций:

- разделение территории Припятского калиеносного бассейна на отдельные элементы, отличающиеся по рангу и характеру гиперсоляных ассоциаций калиеносной субформации;
- составление классификаций элементов районирования по основным показателям (практическая значимость или перспективность, степень изученности и надежность определения перспективности, вид рекомендуемых работ и т.д.);
- установление критериев проведения границ элементов районирования;
- оконтуривание элементов районирования.

Составление легенды к схеме прогнозно-минерагенического районирования Припятского прогиба основывалось на типолого-географическом принципе, заключающемся в выделении определенных типов территориальных единиц того или иного порядка на основе учета свойственных им наиболее общих и существенных признаков и отказе от учета частных особенностей этих единиц. При этом характеристика прилагается не к каждому конкретному контуру, выделенному на карте, а к группе контуров данного типа. Типизация и классификация выделенных территориальных единиц может осуществляться на любом таксономическом уровне, однако на каждом этапе исследований районирование проводится применительно только к одному из них.

Разработанная структура легенды определила смысловое содержание картосхемы. Использованы авторские и традиционные решения по нагрузке, содержанию и дизайну схемы прогнозно-минералогического районирования с учетом принятых методических подходов и основных задач исследования. Легенда включает условные обозначения элементов специализированной геологической информации, тематической и общегеографической основ.

*Тематическая основа* отображена с помощью площадного слоя прогнозно-минерагенических подразделений и включает в себя показ:

- разведанных и оцененных месторождений калийных солей с указанием их геолого-промышленной принадлежности, качества, степени изученности и освоенности; изученных и оцененных калиепроявлений с указанием предполагаемого геолого-промышленного типа и качественных характеристик калийных солей;
- прогнозных площадей, рассматриваемых в качестве перспективных на калийные соли, с указанием прогнозируемого типа калиеносности, степени калиеносности (калийные или потенциально калиеносные), геолого-промышленной специализации;
- границ месторождений и перспективных на калийные соли участков, определенных и прогнозируемых.

При этом обязательным было решение проблемы достоверной генерализации первичной информации и построение генерализованного изображения, включая два взаимосвязанных аспекта: генерализацию легенды и генерализацию пространства картосхемы (так называемая «пространственная генерализация»). В качестве единиц прогнозно-минерагенического районирования использованы месторождения и перспективные участки.

*Специализированная геологическая информация* максимально разгружена для нанесения основных элементов прогнозно-минерагенического районирования (тематической основы). В рамках структурно-формационных комплексов, специализирующихся на исследуемых полезных ископаемых, выделены ареалы распространения галогенных формаций. В качестве отдельных элементов на схеме отражены глубинные разломы, ограничивающие Припятский прогиб; разрывные нарушения по поверхности межсолевых отложений с раз-



- оценка прогнозных ресурсов;
- геолого-экономическая оценка;
- схема блокировки запасов (см. рис. 5).

В настоящее время в развитии калийной отрасли превалирует направление «территориальной агрессии», а экономические показатели работы калийной промышленности тесно связаны с эффективностью взаимодействия минерально-сырьевого и горно-перерабатывающего комплексов. Четкая аргументация очередности и объективность критериев выбора рекомендуемых к разработке объектов имеют при этом чрезвычайную важность, являясь неременным условием принятия правильных управленческих решений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Айзберг Р.Е., Старчик Т.А. Синрифтовая геодинамика Припятского прогиба. — Минск: Беларуская навука, 2013. — 146 с.
- 2) Беленицкая Г.А. Соленосные осадочные бассейны. Литофации, геодинамический и минерагенический анализ. Осадочные бассейны России. СПб: изд-во ВСЕГЕИ, 2000. — Вып. 4. — 72 с.
- 3) Бескопильный В.Н. Пояснительная записка к картам структурного районирования подсолевого и межсолевого комплексов Припятского прогиба для решения задач эффективного освоения ресурсов углеводородов / В.Н. Бескопильный, Р.Е. Айзберг, Я.Г. Грибик. — Гомель, 2011. — 48 с.
- 4) Петрова Н.Ю., Денисова Н.Ю., Глаз Н.В., Шестаков К.В. Прогнозно-минерагеническое районирование средневерхнефаменской калиеносной субформации в пределах территории Припятского прогиба // Літасфера. — 2024. — № 2 (61). — С. 5-19.

## **ОПЫТ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРОГНОЗНЫХ И ПОИСКОВЫХ ПЛОЩАДЕЙ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕСЧАНИКОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА**

*Печенкин И.Г.  
ФГБУ «ВИМС», Москва*

Более 70-ти лет отделяют нас от начала освоения геологами-уранщиками Центральных Кызылкумов, где уже первые находки промышленных урановых руд явились объектом жарких дискуссий между сторонниками различных взглядов на их образование. На примере первого Учкудукского месторождения стали разрабатываться основы пластово-инфильтрационного рудообразования и комплекс критериев рудоносности, которые легли в основу методики прогноза, поисков и разведки эпигенетических месторождений урана. Применяя эту методику на практике, совместными усилиями геологов-производственников (Краснохолмская и Волковская экспедиции) и сотрудников ведущих НИИ (ВИМС, ИГЕМ, ВСЕГЕИ и др.) была открыта крупнейшая в мире Притяньшаньская урановорудная мегапровинция (рис. 1) [2, 7, 9, 14, 17 и др.].

Открытие в эти годы урановых месторождений нового генетического типа (песчаный по типизации МАГАТЭ) заставило обратить на них серьезное внимание. Интерес к рассматриваемым объектам определялся их крупными и уникальными масштабами, легкостью и экономической выгодой отработки способом подземного выщелачивания и поликомпонентным составом руд (*Se, Mo, V, Re, Sc* и др.). Уже на первых этапах исследований было установлено, что урановые объекты, локализующиеся в краевых частях нефтегазоносных бассейнов, обладают рядом особенностей [6, 8, 11, 15, 17 и др.].

Еще в 1950-е гг. на месторождении Майлисай (Ферганская впадина) впервые изучалось взаимоотношение окислительных и восстановительных процессов в карбонатной толще палеогена. В те годы превалировала сингенетическая гипотеза происхождения месторождений Ферганы. Она была общепризнанной и позднее неоднократно развивалась и модифицировалась [4, 5 и др.]. Сыграв на первом этапе положительную роль в развитии геолого-прогнозных и поисковых работ в Ферганской впадине, она ограничивала перспективы выявления новых урановорудных объектов карбонатными горизонтами палеогена, по существу оставляя вне рассмотрения терригенные осадочные толщи.

Вместе с тем, в нее не укладывались многочисленные накапливавшиеся данные о наложенном характере руд и их связи с проницаемыми водо-нефтеносными горизонтами. Это позволило ряду гидрогеологов ВСЕГИНГЕО и экспедиции № 1 ИГЕМ, а затем литологов под руководством В.Н. Холодова выдвинуть в 1953-1958 гг. альтернативную идею генезиса руд майлисуйского типа и связать их образование с процессами биохимического окисления залежей углеводов ураноносными сульфатными пластовыми водами. Было определено наличие дорудного и пострудного эпигенеза нефтяного ряда. Часть уранового оруденения оказалась залита жидкой нефтью [1, 2, 15, 17 и др.]. Стало очевидно, что месторождения в осадочной толще Ферганского нефтегазоносного бассейна имеют тот же генезис, что и объекты, открытые в Центральных Кызылкумах. Только здесь

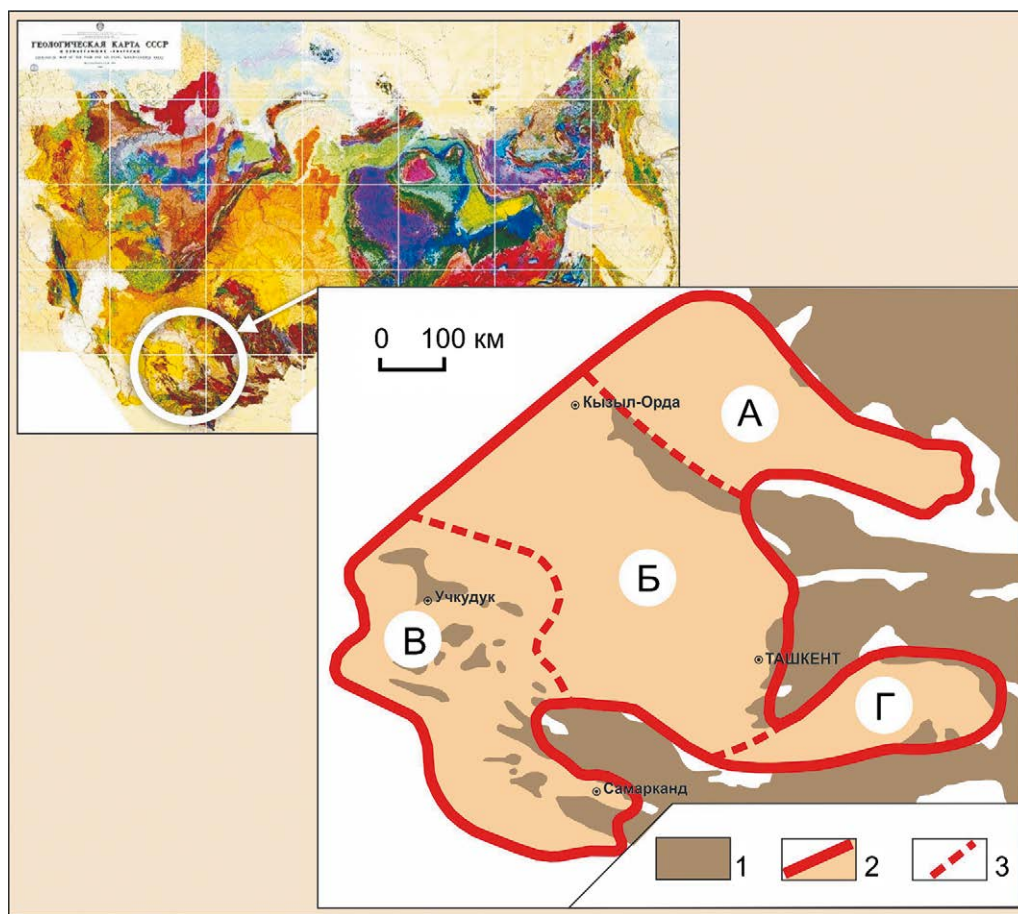


Рис. 1. Притяньшаньская урановорудная мегапровинция

1 – выходы пород фундамента на дневную поверхность; 2 – граница мегапровинции; 3 – границы урановорудных провинций и областей (провинции: А – Чу-Сарысуйская, Б – Сырдарьинская, В – Кызылкумская; области: Г – Ферганская)

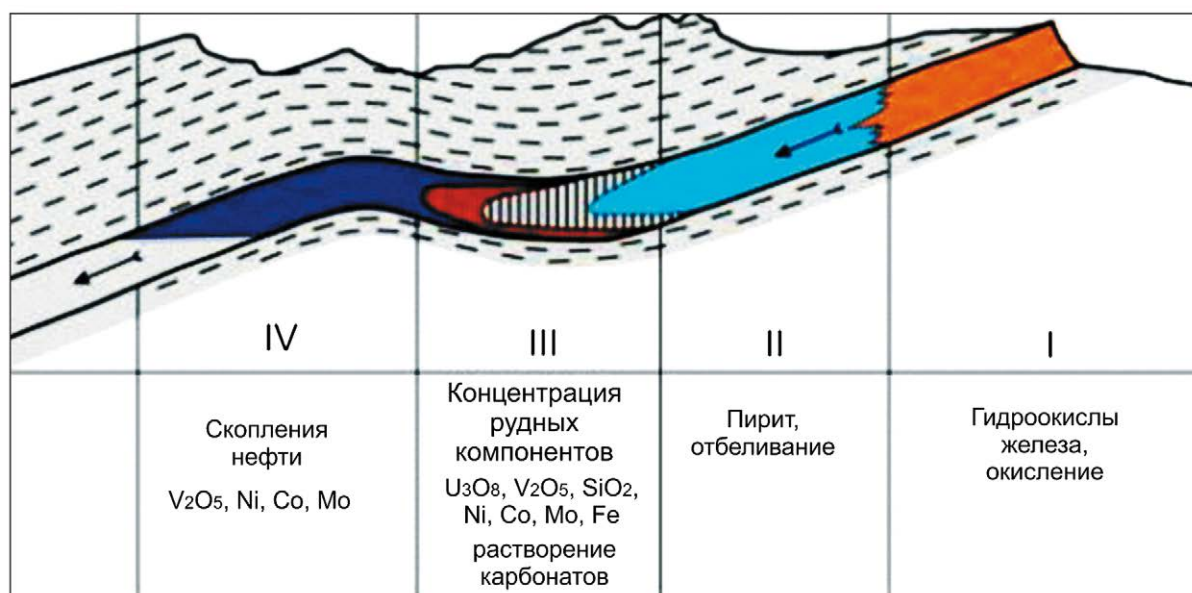


Рис. 2. Эпигенетическая зональность на месторождении Майлисай [15]



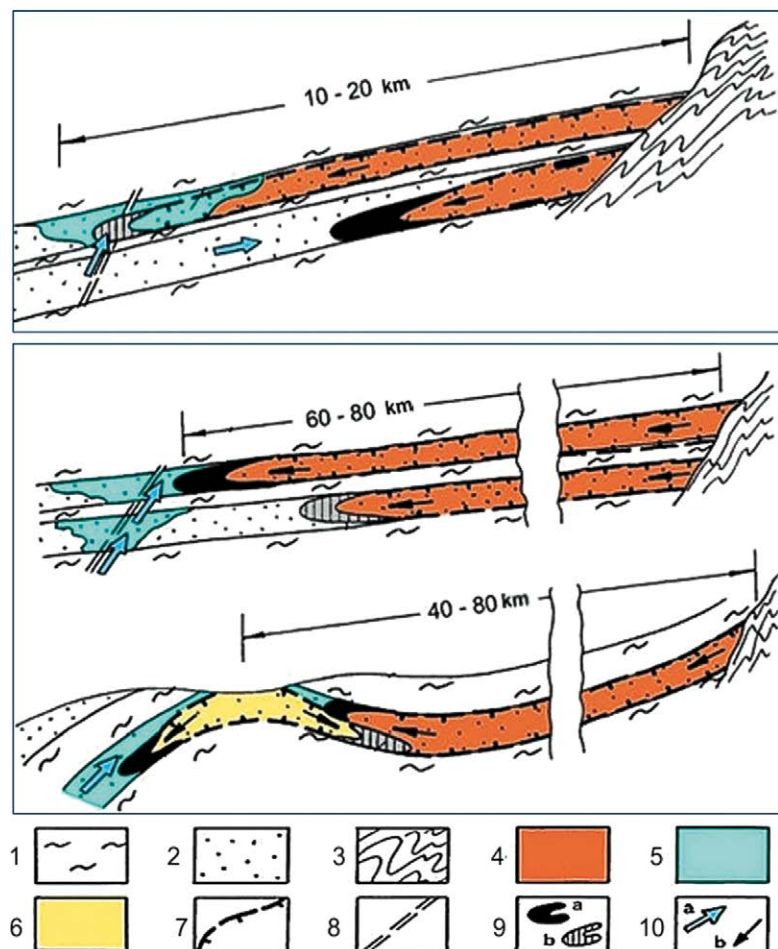
сформировалась специфическая эпигенетическая зональность, имеющая ряд отличий от установленной вдали от залежей углеводородов (см. рис. 2) [15, 17].

В середине 1960-х гг. на месторождении Сабырсай (Узбекистан) в первично-красноцветных континентальных отложениях мелового возраста изучались дорудные восстановительные изменения, благодаря которым на контрастном геохимическом барьере сформировалось промышленное урановое оруденение. Изучение специалистами ВСЕГЕИ (Г.В. Грушевой, И.С. Оношко и др.) особенностей взаимоотношения эпигенетических процессов в зоне сочленения Центрально-Кызылкумского поднятия и Амударьинской впадины в пределах определившейся урановорудной провинции позволило установить наличие однотипных критериев образования месторождений в водоносных горизонтах мелового возраста. Изучение рудной зональности месторождения Сабырсай показало, что важную роль при этом играют углеводороды и продукты их разрушения [2, 3, 13].

Сложность процессов определяется двойной ролью углеводородных флюидов и продуктов их разрушения. С одной стороны, битуминизация проницаемых пластов, а также связанные с этим пиритизация, хлоритизация, доломитизация и др. изменения создают благоприятную геохимическую обстановку восстановительного характера для последующей концентрации урана, с другой – внедрение битумов и их разрушение в зоне аэрации приводит к «захоронению» сформированного ранее оруденения и исчезновению следов его образования – эпигенетической окислительной зональности. Это затрудняет прогнозные и последующие поисково-разведочные работы (рис. 3).

Рис. 3. Примеры взаимоотношения окислительных и восстановительных процессов (месторождение Сабырсай) (по И.Г. Печенкину, 1988)

- 1 – глины, 2 – пески, песчаники, 3 – породы фундамента, 4 – окисление, 5 – восстановление, 6 – «молодое» окисление, 7 – граница зоны окисления, 8 – разломы; 9 – оруденение: а – балансовое, б – забалансовое; 10 – направление движения флюидов: а – восстановительных, б – окислительных





Позднее, в 1970-е гг., к близким выводам пришли и американские геологи, изучавшие урановые месторождения нефтегазоносной Техасской равнины. На месторождении Беневидес, по их мнению, основное оруденение тяготеет к границе выклинивания зон пластового окисления, развивающихся в эпигенетически восстановленных породах. На ряде объектов отмечено и повторное – пострудное – восстановление [10].

Исследования на небольшом объекте Комсомольское (Таджикистан), локализирующемся в неогеновой первично-красноцветной молассе, доказали возможность рудогенеза в геологически «юных» отложениях, предварительно подвергшихся восстановлению. Ранее такие осадочные образования считались малоперспективными. Красноцветные породы приобрели светло-серую и голубую окраску. В центральной части участка породы восстановлены полностью. По периферии сохранились реликты красного цвета (рис. 4). По восстановленным отложениям развивалась зона пластового окисления. На ее выклинивании концентрировались уран, молибден, иттрий, серебро [2].

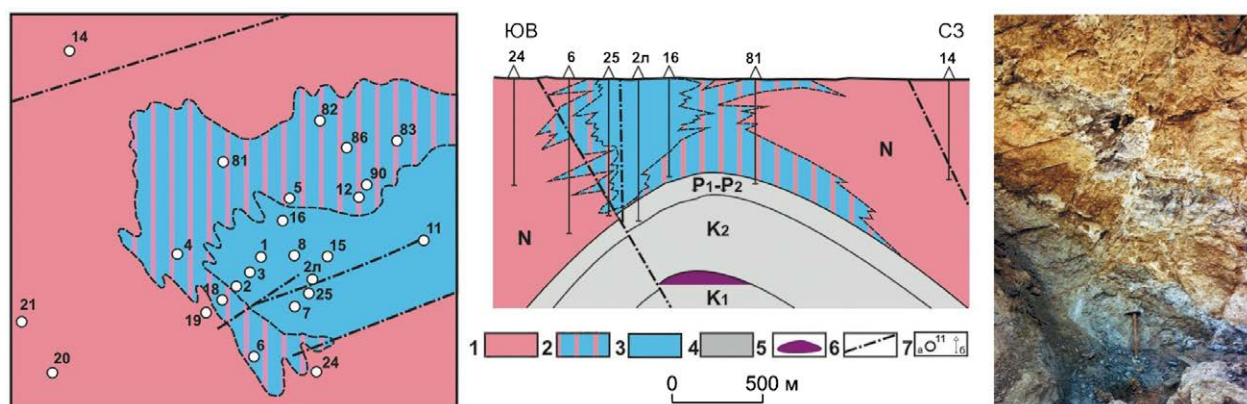


Рис. 4. Эпигенетические изменения на проявлении Комсомольское (по [2] с дополнениями)

Породы: 1 – красноцветные, 2 – частично восстановленные, 3 – полностью восстановленные, 4 – сероцветные; 5 – залежь нефти; 6 – разломы; 7 – скважины (а – на плане, б – на разрезе). На фотографии типичное восстановление пород неогена

В 1960–1970-е годы специалистами ВИМСа (Е.М. Шмариовичем, Е.А. Головиным, В.Н. Щеточкиным и др.) в Центрально-Кызылкумской урановорудной провинции (Узбекистан) была разработана и применена методика изучения эпигенетических изменений в осадочных толщах. Она заключается в том, что более поздние изменения осадочных пород отмечаются в самых водопроницаемых разностях разреза (пески, гравелиты, конгломераты). Ранние процессы могут сохранить свои следы в алевритистых и глинистых частях осадочной толщи или в грубозернистых породах на крепком цементе. Это выражается в появлении в них цветных каемок различного генезиса. Чем дальше от контакта с водоносным горизонтом находится в слабопроницаемой породе кайма, тем более раннему наложенному изменению она соответствует (рис. 5).

Взаимоотношения эпигенетических процессов определяют особенности рудогенеза различных частей нефтегазоносных бассейнов. Их выявление на основе специализированного картирования создает предпосылки для определения перспектив как локальных участков недр, так и крупных геологических структур.

Устанавливаемая последовательность эпигенетических изменений позволяет проводить картирование на перспективных площадях с обнаружением скрытых частей эпи-

генетической окислительной зональности и «захороненного» оруденения. Такие работы осуществлены в пределах Ордосского нефтегазоносного бассейна (рис. 6) [12].

Для бассейна Ордос и прилегающих структур на основе специализированного картирования создан комплект разрезов и палеокарт. Они отражают в ретроспективе взаимоотношения процессов окислительного и восстановительного рядов на протяжении крупных этапов геологической истории региона. Все построения осуществлены для изменений, происходивших в отложениях среднеюрского возраста – основного рудовмещающего горизонта. Здесь зона окисления за счет внедрения восстановителей изменила свой цвет с желтого и буро-желтого на зеленый и серо-зеленый. Это обусловлено формированием эпигенетического хлорита. Окисление сохранилось в реликтах. Последовательность преобразования осадочной толщи проиллюстрирована на рис. 6.

В результате исследований в регионе выделяется несколько этапов гидрогенного рудообразования на фоне взаимодействия окислительных (рудных) и восстановительных процессов. Генерация нефтегазовых восстановителей преимущественно осуществлялась в южной части Ордосской впадины. Направления движения углеводородных флюидов определялось геодинамическими условиями, часто обуславливающими формирование очагов разгрузки в зонах разломов. На протяжении всех этапов постепенно уменьшалась роль латеральной миграции восстановительных флюидов при возрастании субвертикальной. Урановый рудогенез связан с развитием зон грунтового и пластового окисления. В первом случае его интенсивность низкая, во втором – максимальная. Своего апогея он достигает на северо-востоке синеклизы (рудное поле Дуншэн).

Методические приемы специализированного картирования позволяют установить последовательность процессов и оценить роль углеводородов при формировании песчаниковых месторождений урана. Примененная при работе методика изучения эпигенетических изменений в породах нефтегазоносных осадочных бассейнов, разработанная на урановых объектах Средней Азии и апробированная в Монголии, Китае, Чехии, Германии и других странах, успешно использована при прогнозных исследованиях в краевых частях нефтегазоносных бассейнов России и других регионов Мира [3, 13, 16 и др.].

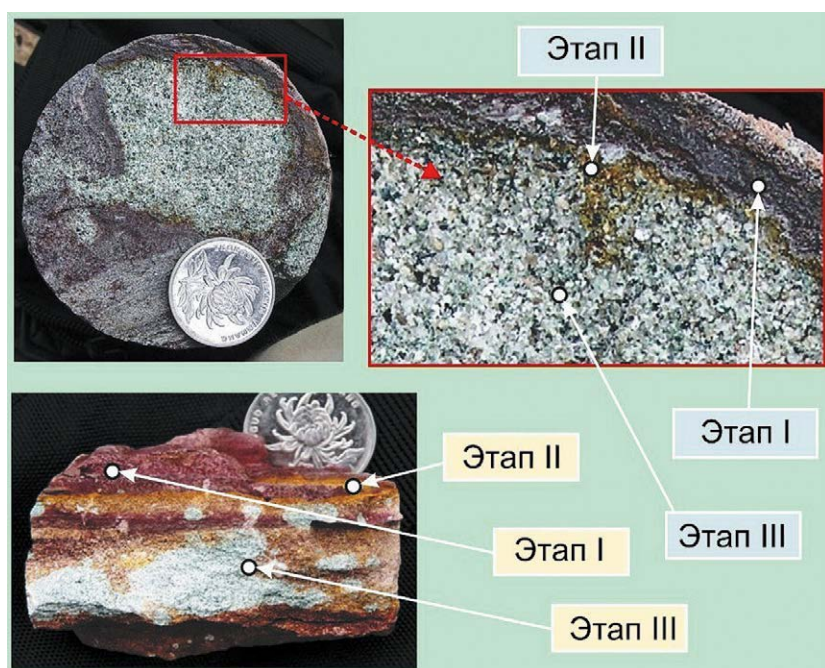


Рис. 5. Примеры последовательности эпигенетических изменений

Разломы:

- 1 – основные,
- 2 – второстепенные,
- 3 – сдвиги;
- 4 – зоны растяжения.

Эпигенетические изменения:

- 5 – пластовое окисление,
- 6 – грунтовое окисление,
- 7 – восстановление;
- 8 – урановое оруденение.

Направление движения  
пластовых вод:

- 9 – инфильтрационных,
- 10 – эксфильтрационных  
в мезозойских отложениях,
- 11 – эксфильтрационных  
в палеозойских отложениях;
- 12 – очаги разгрузки пластовых  
вод

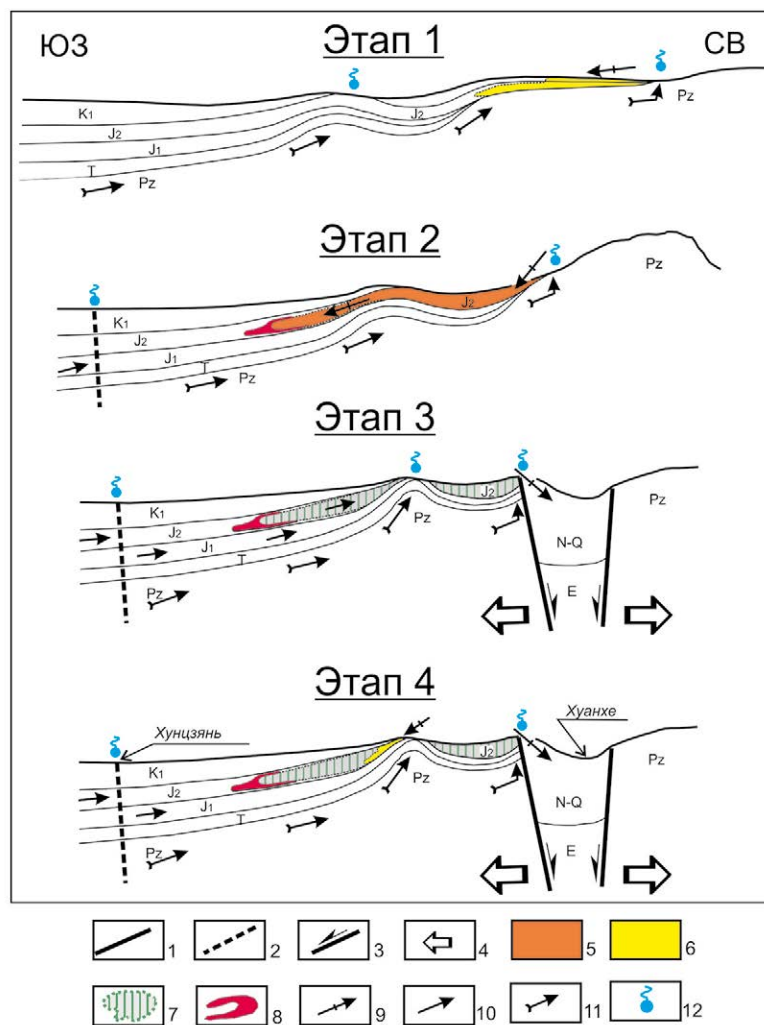


Рис. 6. Модель формирования месторождения урана Дуншэн (бассейн Ордос, Центральный Китай) (по И.Г. Печенкину, 2000)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Германов А.И. Кислород подземных вод и его геохимическое значение // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1955. – № 6. – С. 70-82.
- 2) Гидрогенные месторождения урана. Основы теории образования / С.Г. Батулин, Г.В. Грушевой, О.И. Зеленова и др. М.: Атомиздат, 1980. – 270 с.
- 3) Грушевой Г.В., Печенкин И.Г. Металлогения ураноносных осадочных бассейнов Центральной Азии. М.: ВИМС, 2003. – 102 с.
- 4) Данчев В.И., Лапинская Т.А. Месторождения радиоактивного сырья. 2-е изд., переработанное. М.: Недра, 1980. – 253 с.
- 5) Данчев В.И., Стрелянов Н.П. Экзогенные месторождения урана. М.: Атомиздат, 1979. – 245 с.
- 6) Каширцева М.Ф. Методы изучения эпигенетических изменений в рыхлых осадочных породах. М.: Недра, 1970. – 152 с.
- 7) Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н. Гидрогенное рудообразование. М.: ЗАО «Геоинформ-марк», 2000. – 608 с.

- 8) Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. Л.: Недра, 1992. — 239 с.
- 9) Максимова М.Ф., Шмариович Е.М. Пластово-инфильтрационное рудообразование. М.: Недра, 1993. — 160 с.
- 10) Мейнард Дж. Геохимия осадочных рудных месторождений. М.: Мир, 1985. — 360 с.
- 11) Парагенезис металлов и нефти в осадочных толщах нефтегазоносных бассейнов / Д.И. Горжевский, А.А. Карцев, Д.И. Павлов и др. М.: Недра, 1990. — 268 с.
- 12) Печенкин И.Г., Печенкин В.Г. Гидрогенное рудообразование в Ордосском осадочном бассейне // Осадочные процессы: седиментогенез, литогенез, рудогенез (эволюция, типизация, диагностика, моделирование). Материалы 4-го Всероссийского литологического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2006. — С. 174-176.
- 13) Печенкин И.Г., Печенкин В.Г. Эволюция осадочного рудообразования в флювиальных палеосистемах. М.: ВИМС, 2008. — 78 с.
- 14) Учкудукский тип урановых месторождений Республики Узбекистан / Х.К. Каримов, Н.С. Бобоноров, К.Г. Бровин и др. Ташкент: Фан, 1996. — 334 с.
- 15) Холодов В.Н., Лисицин А.К., Комарова Г.В., Кондратьева И.А. Об эпигенетической зональности в нефтеносных карбонатных породах // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1961. — № 11. — С. 50-63.
- 16) Холодов В.Н., Шмариович Е.М. Рудогенерирующие процессы элизионных и инфильтрационных систем // Геология рудных месторождений. — 1992. — № 1. — С. 3-22.
- 17) Экзогенные эпигенетические месторождения урана. Условия образования / Под ред. А.И. Перельмана. М.: Атомиздат, 1965. — 324 с.

## МАТЕРИАЛЫ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ МПИ (U, Au)

Поцелуев А.А. – 1,3, Ананьев Ю.С. – 1, Житков В.Г. – 1,2

1 – НИ ТПУ, 2 – НИ ТГУ, 3 – ООО «КосмоГеопр», г. Томск

*На основе комплексного структурно-вещественного дешифрирования показана высокая эффективность использования материалов современных космических съемок при прогнозно-поисковых и разведочных работах в рудных районах и на месторождениях урана и благородных металлов различных промышленно-генетических типов.*

Использование материалов мультиспектральных космических съемок (МКС) весьма актуально как на малоизученных площадях, так и в пределах известных рудных районов. МКС позволяют получать и уточнять как традиционную информацию, так и выявлять новые данные о геологическом строении и особенностях минерализации изучаемых площадей. В первом случае это картирование различных по составу геологических тел, элементов тектоники и др. К новым данным относятся, главным образом, структуры различной морфологии, выявление которых традиционными методами затруднено в силу методических особенностей их проведения (профильность и дискретность наблюдений), либо они проявляются только в данных мультиспектральных наблюдений, включающих «невидимые» области спектра.

Важнейшими факторами, определяющими высокую информативность МКС, являются: обзорность, непрерывность, наглядность и требуемая детальность; естественная генерализация; повышенная глубинность; равноазимутальная информативность. На МКС, охватывающих единой сценой значительные площади, происходит генерализация мелких «второстепенных» деталей, которые фиксируют слабопроявленные геологические образования (в том числе рудоносные зоны). Что, в свою очередь, определяет и их повышенную глубинность – «проявленность» на современной «дневной» поверхности слепых и погребенных геологических тел. Это обусловлено геофизическим и геохимическим (подвижные формы и соединения элементов) влиянием тел на элементы ландшафта, спектральные характеристики перекрывающих рыхлых отложений, почв и растительности (Аэрокосмические ..., 2000; Ананьев и др., 2012; Поцелуев и др., 2019; Несмеянова, Березнев, 2022 и др.).

В данной статье приведены результаты использования МКС при решении прогнозных, поисковых и разведочных задач на некоторых урановых и золоторудных объектах различных промышленно-генетических типов. Данные объекты расположены в районах, резко отличающихся по природно-климатическим условиям, характеру и степени развития растительности, составу и мощности перекрывающих рыхлых отложений.

В основу исследований положены материалы мультиспектральных космических съемок низкого – среднего (*Modis, Landsat ETM+, Landsat 8, Aster*) и высокого пространственного разрешения (*Ikonos, WorldView-1, WorldView-2, GeoEye-1, QuickBird, Alos*), а также цифровые модели рельефа по данным *SRTM* и *AsterGDEM*. Как правило, использовались материалы архивных съемок, но в ряде случаев съемки выполнялись оперативно по заказу.

В большинстве случаев материалы данных исследований были учтены в итоговых геолого-структурных построениях и подтверждены результатами горных и буровых работ.

Урановорудные (золото-урановые) районы и месторождения: Эльконский горст (Южная зона, Северное м-ние), Хиагдинское рудное поле (Кореткондинское, Намаруское, Хиагдинское, Дыбынское м-ния), м-ние Курдай.

Различные в иерархическом плане (от провинции до месторождения) ураноносные образования проявляются в МКС определенными характерными структурами кольцевой, линейной и блоковой морфологии (Поцелуев и др., 2021).

Во многих работах отечественных и зарубежных специалистов показано, что формирование масштабных урановых месторождений связано с крупными структурами земной коры изометричной формы – гранито-гнейсовыми куполами, вулканотектоническими депрессиями, кальдерами и др. При этом подчеркивается, что месторождения урана областей континентального вулканизма обнаруживают закономерную приуроченность к интрагеоантиклиналям разновозрастных складчатых систем. В этом отношении не являются исключением и урановые месторождения других типов, например, «несогласия» и месторождения зон пластового окисления.

**Центрально-Алданский (Эльконский) золото-урановый рудный район** расположен в северо-восточной части Алданского горнопромышленного района Республики Саха (Якутия). Район находится на периферии гигантского купола раннедокембрийских пород и пространственно ассоциирует с ареалом субвулканических интрузий щелочноземельных-щелочных пород.

Выполненный ранее (Казанский, Максимов, 2000) анализ МКС, морфоструктур, глубины залегания кристаллического фундамента, распределения радиальных и кольцевых разломов позволил выделить здесь радиально-кольцевую структуру диаметром около 120 км, названную Центрально-Алданским магматектоногеном. Он состоит из ядра, радиальных блоков и вмещает основную часть мезозойских щелочных пород, золотые, урановые и золотоурановые месторождения. Магматектоноген выделяется в гравитационном поле, ему также соответствует высокоомная воронка, уходящая корнями в верхнюю мантию.

Нами выполнена обработка и дешифрирование МКС среднего и высокого разрешения и цифровой модели рельефа. В результате проведенных работ получены структурные схемы Эльконского урановорудного района и месторождений Зоны Южная, являющейся наиболее крупной ураноносной структурой района (рис. 1).

Основными структурами Эльконского рудного района являются (рис. 1а):

- структуры северо-западного простиранья. К структурным элементам данной ассоциации относятся и потенциально рудоносные зоны. В целом Эльконский рудный район залегает в пределах зоны линейаризации северо-западного простиранья, ширина выхода которой превышает 24 км. В пределах данной зоны статистически возможно выделить несколько локальных линейных струй мощностью 2,5-3,5 км;
- линеаменты субширотного простиранья, образующие пучки и зоны мощностью около 1,5 км. В ряде случаев наблюдается срезание ими северо-западных зон;
- структуры север-северо-западного направления в основном проявлены в центральной и западной частях исследуемой территории. Они являются более молодыми по отношению к линеаментам северо-западного направления. Эти нарушения образуют зону, названную нами Секущей. Зона Секущая имеет ширину выхода на дневную поверхность около 6 км и дугообразную форму в плане, что свидетельствует о ее наклонном залегании с падением к северо-востоку. В пределах зоны выделяются два блока: лежащий (на структурной схеме отмечен красной штриховкой) и висячий (обозначен серой штриховкой). Лежащий блок характеризуется развитием цепочки кольцевых структур,



которые являются отражением глубинных очагов, с которыми, по-видимому, связано формирование интрузивных и субвулканических тел. Висячий блок захватывается только периферическими частями кольцевых структур. «Рудные столбы», которые отмечаются аномалиями, главным образом, урана и золота на продольных проекциях зоны Южной, развиты только в пределах висячего блока Секущей зоны. Учитывая острый угол между простираем зоны Южной и зоны Секущей и их встречное падение, можно сделать вывод о полого погружающейся к юго-востоку их линии скрещения. То есть в том же направлении, что и склонение «рудных столбов»;

- кольцевые структуры имеют различные размеры. Их диаметры лежат в пределах от 35-45 до 2,5 км. Наибольшее распространение имеют кольцевые элементы с диаметрами 8,5-11 км. На площади работ кольцевые структуры формируют пояс, имеющий северо-западное – субмеридиональное простираение.

Основные структурные элементы Эльконского рудного района детализированы при изучении зоны Южная (рис. 1б).

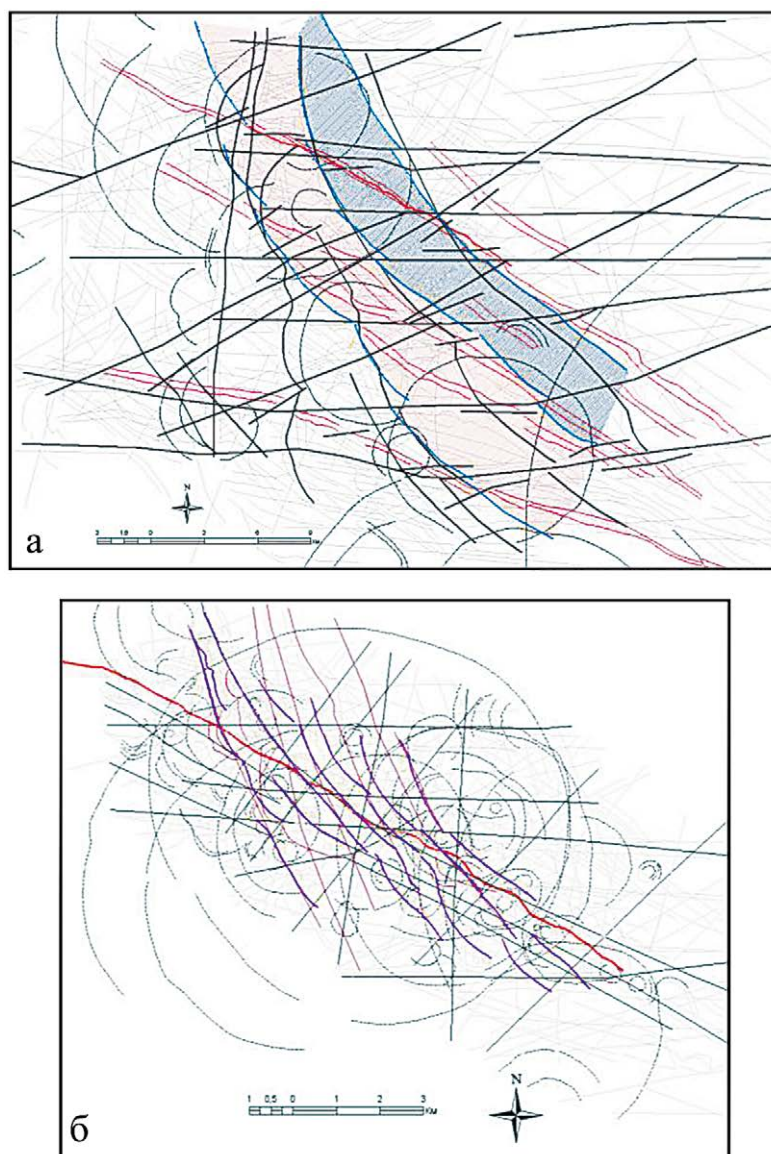


Рис. 1. Структурные схемы Эльконского урановорудного района (а) и Зоны Южная (б)

**Хиагдинское урановорудное поле** располагается в пределах Амалатского плато. Наиболее крупная тектоническая структура – Байсыханское поднятие кристаллического фундамента, прослеживающееся через всё плато с юго-запада на северо-восток. Размещение рудных залежей контролируется погребенными под платобазальтовым покровом палеодолинами (выполнены палеогеновыми осадками), развивающимися на юго-восточном и северо-западном склонах поднятия. В пределах Хиагдинского рудного поля известны 8 месторождений, из которых изучены Дыбынское, Хиагдинское, Кореткондинское, Намаруское (Поцелуев и др., 2021). Все они относятся к гидрогенному палеодолинному типу.

В пределах месторождения **Дыбынское** (рис. 2) развиты два структурных парагенезиса разрывных нарушений – ранний и поздний. К структурам раннего парагенезиса отнесены разрывные нарушения субмеридионального (север-северо-восточного) простирания и ортогональные структуры субширотного простирания. По субмеридиональным структурам дешифрируются левосдвиговые смещения. Разрывные нарушения позднего парагенезиса представлены северо-восточными и северо-западными структурами. Главная тектоническая структура позднего парагенезиса – Кореткондинский разлом. В северо-восточной части площади он дешифрируется двумя швами, в центральной части осложняется ортогональными структурами второго порядка северо-западного простирания. В центральной и юго-западной частях месторождения закартированы 6 кольцевых структур, которые интерпретируются как элементы погребенных вулканических построек и как жерла вулканических аппаратов центрального типа.

На **Хиагдинском** и **Кореткондинском** месторождениях также установлены разрывные нарушения двух структурных парагенезисов – раннего и позднего (рис. 3). Главными разрывными нарушениями месторождений соответственно являются Хиагдинский и Кореткондинский разломы северо-восточного направления. По этим разломам определяются вертикальные перемещения северо-западных блоков относительно юго-восточных с амплитудой 25 и 15 м соответственно. По более поздним разломам северо-западной ориентировки отмечаются малоамплитудные право- и левосдвиговые смещения.

Выполненные исследования показывают, что структуры месторождений Хиагдинского рудного поля контрастно проявлены в МКС. Достаточно уверенно фиксируется положение погребенных палеодолин. Дешифрируемые в пределах месторождений кольцевые структуры интерпретируются как элементы погребенных вулканических построек.

**Месторождение Кордай (U-Au-Cu)** находится в южной части гор Кендыктас. Гидротермальное оруденение приурочено к участкам березитизации вдоль Курдайского разлома. Урановые руды месторождения были отработаны в середине XX века. Но в пределах рудного поля представляет интерес комплексное *U-Au-Cu* оруденение. Необходимо отметить, что на многих урановых месторождениях, ранее разведанных и частично отработанных, отмечаются высокие содержания золота и других благородных металлов (Поцелуев, 2014).

Разработана геолого-структурная схема Кордайской площади. На основе обработки снимков высокого разрешения выявлены и прослежены потенциально рудоносные зоны на золото-медно-урановое оруденение. По результатам обработки и дешифрирования материалов космических съемок определены критерии рудоносности площади.

Установлено, что район месторождения характеризуется высокой плотностью развития разрывных нарушений преимущественно северо-западного направления, осложненных северо-восточными, субмеридиональными и субширотными структурами (рис. 4).

Отмечается наличие значительного количества кольцевых структур, которые отражают положение эндогенных энергетических очагов.

На схеме масштаба 1:10 000 (рис. 5) выделены площадные (проявления кислых интрузивных пород, стратифицированных комплексов, участки ороговикования, зоны гидротермалитов), линейные (разрывные нарушения, элементы слоистости) элементы геологического строения, а также техногенные объекты (карьеры, отвал, канавы).

Интрузивные породы участка по особенностям проявления в материалах космических съемок разделены на 5 типов. При их выделении упор делался на текстурно-спектральные характеристики. Контакты интрузивных тел с вмещающими породами в большей мере носят тектонический характер, хотя на отдельных участках фиксируются и интрузивные взаимоотношения.

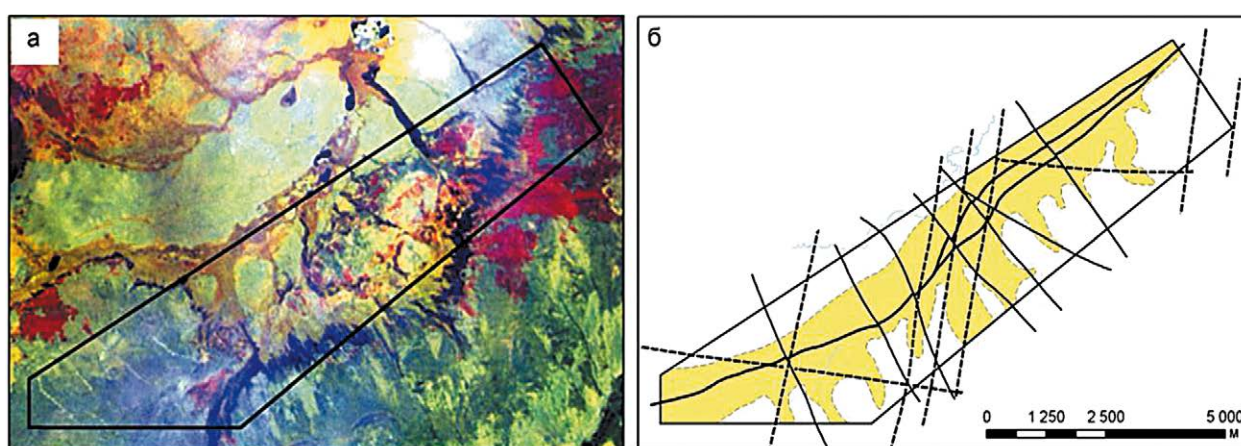


Рис. 2. Месторождение Дыбынское

а — комбинация информативных спектральных каналов; б — структурная схема

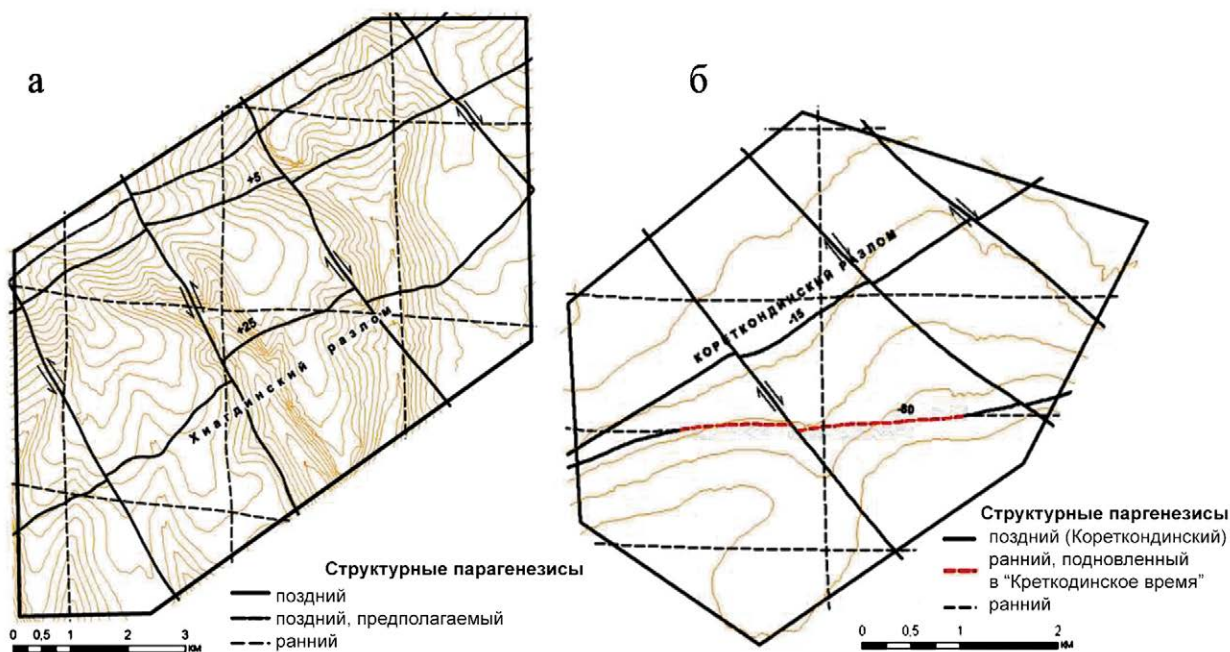


Рис. 3. Структурные схемы Хиагдинского (а) и Кореткондинского (б) месторождений





Стратифицированные комплексы наиболее отчетливо проявляются в южной части площади, где устанавливается их преимущественно юго-западное падение. В обрамлении интрузивных пород отчетливо фиксируются контактовые роговики, занимающие значительные площади, в том числе и на некотором удалении от самих массивов, что, возможно, свидетельствует об их пологом контакте.

Разрывные нарушения на площади проявлены достаточно широко. Наибольшим распространением пользуются северо-западные, северо-восточные и субширотные разломы. Меридиональная система разрывных нарушений проявлена единичными швами. По субширотным и северо-восточным разрывам отмечаются левосдвиговые смещения. В северо-западной части площади фиксируется грабеноформная структура, ограниченная разрывами северо-западного простирания.

Зоны метасоматически измененных пород выделены по результатам обработки и интерпретации МКС. Для их выделения использованы индексы *ОН*-содержащих минералов, «пропилитового», трехвалентного железа, а также результаты обработки материалов методом главных компонент. На основании проявления зон гидротермалитов они разделены на дешифрируемые и предполагаемые.

Потенциально рудоносные зоны имеют преимущественное северо-западное простирание. Их положение контролируется грабеноформной структурой северо-западного простирания, разрывными нарушениями северо-западного простирания, поперечной протектонической системой трещиноватости северо-западного простирания, развитой в теле интрузивного массива определенного состава. Локальные проявленные тела метасоматитов объединены нами в две потенциально рудоносные зоны.

Золоторудные и золотосеребряные объекты исследовались в различных районах восточной Якутии, Магаданской области, Чукотки, центральной Сибири, Хабаровского края, Кузнецкого Алатау и за рубежом.

Территория **Уряхского рудного поля**, расположенного в зоне развития Сюльбанского глубинного разлома Байкало-Патомского нагорья, представляет собой сложно построенную тектоно-метаморфическую зону смятия и дробления северо-западного простирания с широко развитыми дизъюнктивными и пликативными нарушениями (Ананьев и др., 2015) (рис. 6). Необходимо отметить, что мощность зоны смятия весьма значительна, а ее границы располагаются далеко за пределами рудного поля.

Положение Уряхского рудного поля в выделенных структурах определяется деформационно-метаморфической зоной в области ее сопряжения с северо-восточными, субширотными и субмеридиональными разрывными нарушениями, во внешней части плутоногенной кольцевой структуры диаметром 27 км.

В геологическом строении Уряхского рудного поля, по данным дешифрирования МКС высокого разрешения, принимают участие стратифицированные комплексы, прорванные дайками плагиогранитов, разбитые сетью разноориентированных разрывных нарушений и подверженные метасоматическим преобразованиям (рис. 7). Контакт между основными стратифицированными подразделениями тектонический.

Главная линейная структура тектонического происхождения – Сюльбанский разлом северо-западного простирания. Он формировался в условиях сжатия и отвечает сколовым структурам. В северной части площади разлом уверенно дешифрируется одиночным швом, который в юго-восточном продолжении испытывает виргацию. В северной части площади отчетливо дешифрируется юго-западное падение практически всех швов разлома, в центральной – вертикальное, а в южной – разлом выкручивается и приобретает



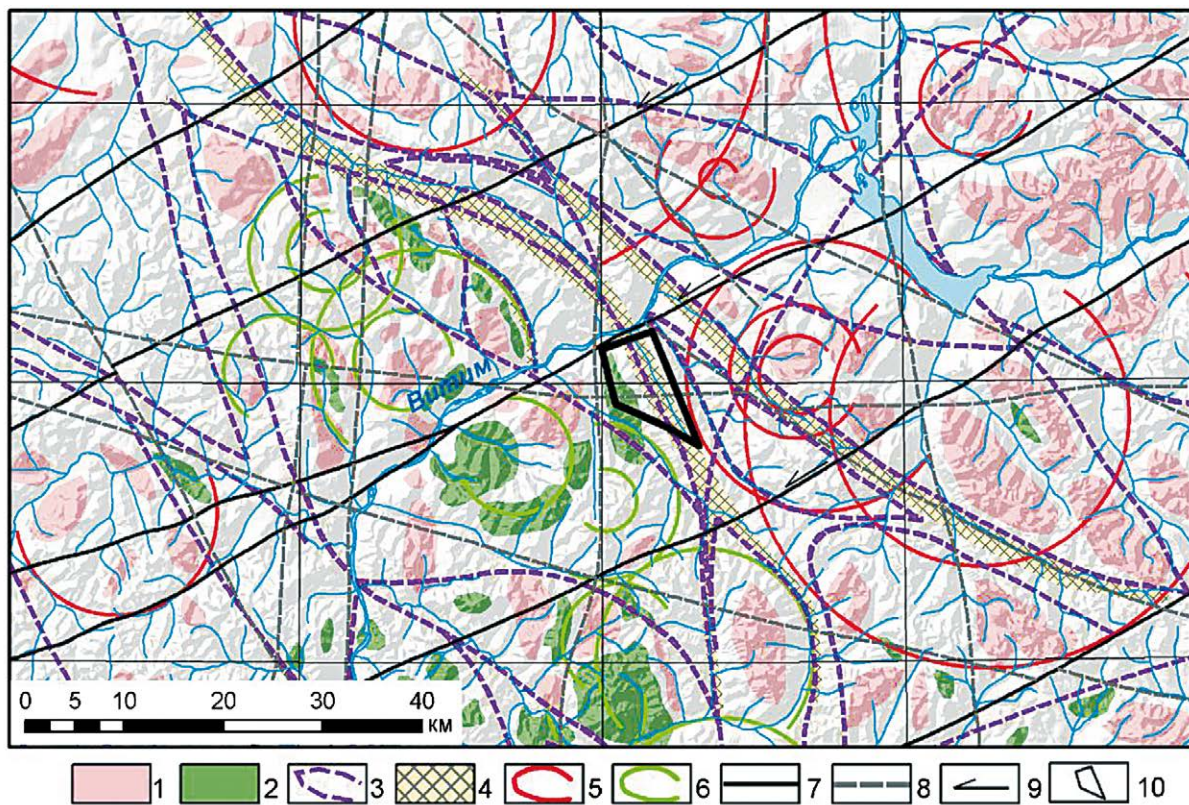


Рис. 6. Положение Уряхского рудного поля в региональных тектонических структурах

1 – интрузии преимущественно кислого состава; 2 – эффузивы преимущественно основного состава; 3 – «тектонические» линзы; 4 – деформационно-метаморфические зоны; 5-6 – кольцевые структуры: 5 – плутогенные, 6 – вулканогенные; 7 – северо-восточные сдвиговые разрывные нарушения; 8 – основные осложняющие нарушения; 9 – кинематические особенности разрывных нарушений; 10 – контур Уряхского рудного поля

крутое северо-восточное падение. В то же время западный шов разлома на всем своем протяжении имеет крутое юго-западное падение. Разрывные нарушения северо-западного простираения образуют линзовидный рисунок и отражают общий линзовидно-свилеватый характер развития деформаций в зоне Сюльбанского глубинного разлома на детальном уровне генерализации.

Следующими по значению разрывными нарушениями являются субширотные структуры, неравномерно развитые в восточной и западной частях рудного поля. По морфологическим особенностям они отвечают взбросо-сдвигам, формировались одновременно с зоной Сюльбанского разлома и определяют клавишное строение площади. Падение этих структур преимущественно северное, северо-восточное и субвертикальное.

Проявления потенциально рудной минерализации отчетливо фиксируются в разномасштабных МКС. Так, по линейно-штриховым зонам выделены участки с предполагаемым развитием кварцево-жильной минерализации, а по спектральным характеристикам МКС – предполагаемые тела метасоматитов березитового профиля. Особенности распределения различных морфологических типов потенциального оруденения позволяет констатировать следующее: вся рудная минерализация располагается в зоне влияния Сюльбанского разлома не далее 850 м от его швов; различные морфологические типы располагаются зонально – на северном фланге развиты преимущественно прожилково-



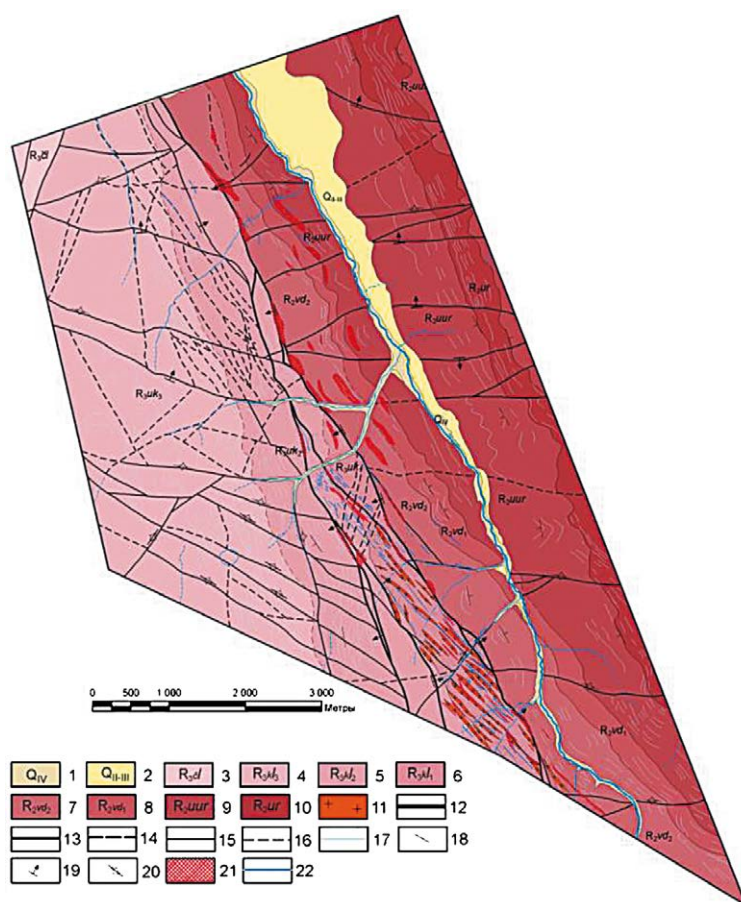


Рис. 7. Космоструктурная схема Уряхского золоторудного поля

1 – пойменные отложения; 2 – террасовые отложения речных долин; 3 – челюкская свита; 4-6 – усть-келянская толща: 4 – верхняя пачка, 5 – средняя пачка, 6 – нижняя пачка; 7-8 – водораздельная свита: 7 – средняя подсвита, 8 – нижняя подсвита; 9 – усть-уряхская свита; 10 – уряхская свита; 11 – дайки плагиогранитов талаинского комплекса; 12-14 – разрывные нарушения: 12 – главные (Сюльбанский разлом), 13 – второстепенные дешифрируемые, 14 – предполагаемые; 15-17 – геологические границы: 15 – дешифрируемые, 16 – предполагаемые, 17 – частные элементы сланцеватости; 18-20 – элементы залегания: 18 – сланцеватости, 19 – наклонных дизъюнктивов, 20 – субвертикальных дизъюнктивов; 21 – участки предполагаемого развития локальных березитов; 22 – линеаменты с предполагаемым развитием кварцево-жильной минерализации

вкрапленные тела в березитах, а на южном, в области виграции основного шва, жильное. Представляется, что оруденение в пределах рудного поля можно ожидать вдоль всей зоны Сюльбанского разлома, причем в северной части поля следует ожидать преимущественно прожилково-вкрапленный тип в березитах, а в южной части – преимущественно жильный кварц-золото-сульфидный тип.

**Исследования Au-Ag рудного поля Светлое** (Охотско-Чукотский вулканический пояс) позволили разработать региональные, локальные и детальные критерии рудоносности (Ананьев и др., 2019). Критериями регионального уровня являются области сопряжения разнонаправленных разрывных нарушений в телескопированных кольцевых структурах диаметром от 20 до 90 км. Критерии локального уровня – области сопряжения систем вложенных соподчиненных кольцевых структур размером от 1 до 10 км с зонами развития Fe-окисных индексов. Критериями детального уровня – малые кольцевые структуры, выполненные телами вторичных кварцитов и аргиллизитов различных минеральных ас-

социаций, сопряженные с зонами развития *Fe*-окисных индексов, внутри участков пропилитового типа изменений.

Использование среднемасштабных и детальных МКС позволило получить схему рудного поля Светлое (рис. 8). Главными ее элементами являются: кольцевые структуры второго и третьего порядков, разнонаправленные линеаменты, различные по составу метасоматиты, зоны развития лимонитизации.

Элементы геологического строения рудного поля явно выражены в МКС. Так, положение палеовулканических построек и их отдельных элементов – кальдер проседания

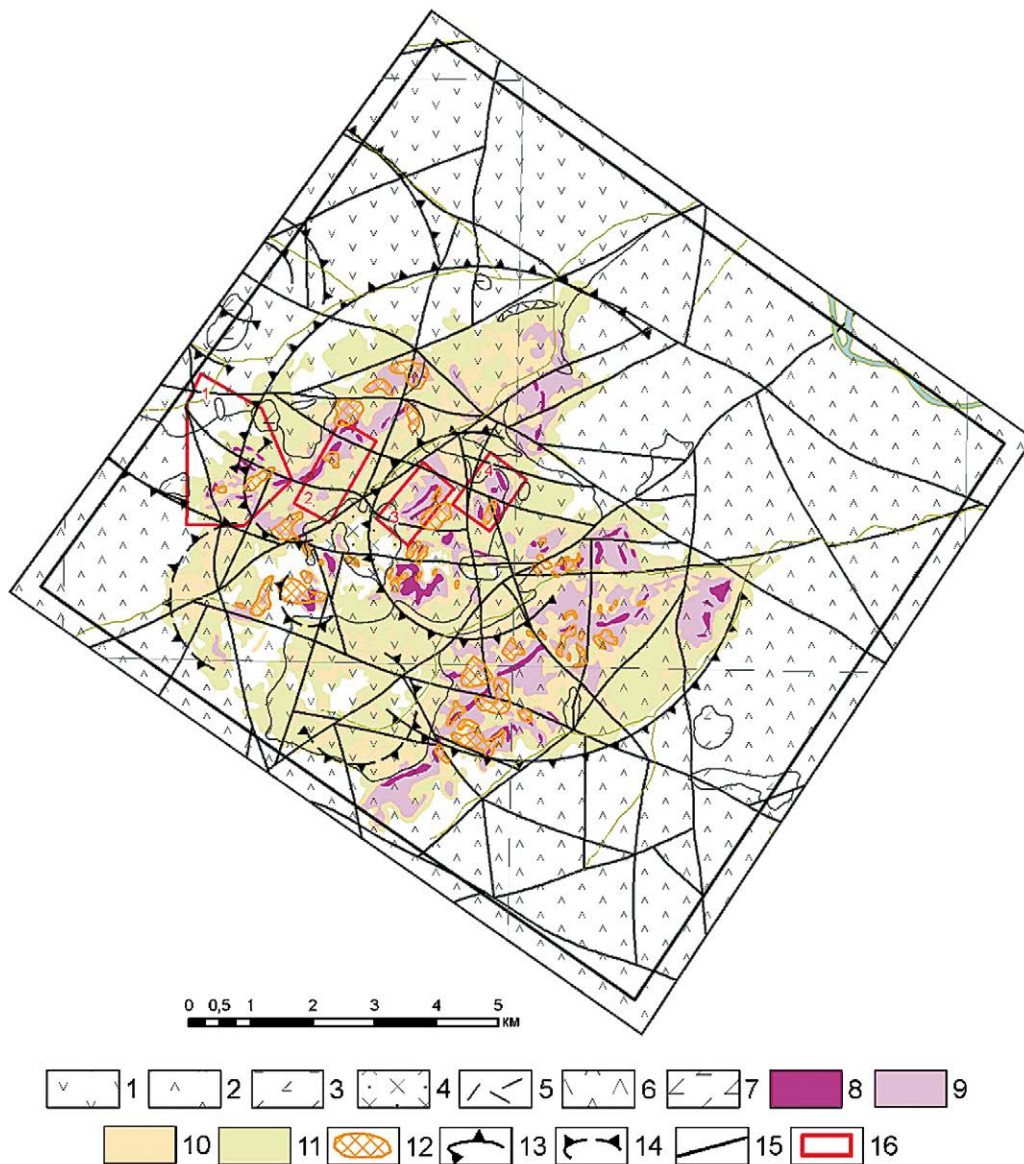


Рис. 8. Детальная космо-геологическая схема рудного поля Светлое

1-2 – уракская свита: 1 – андезиты, андезибазальты, их лавы и туфы, 2 – дациты, туфы, игнимбриты; 3 – андезибазальты хакаринской свиты; 4-6 – уракский дацит-риолитовый комплекс: 4 – гранодиорит-порфиры, 5 – риолиты, 6 – дациты; 7 – штоки андезибазальтов хакаринского комплекса; 8-10 – метасоматические вторичные кварциты: 8 – монокварцевые, 9 – преимущественно кварц-алунит-глинистые, 10 – существенно кварц-гидрослюдистые; 11 – пропилиты хлоритовые; 12 – участки интенсивной лимонитизации; 13-14 – кольцевые структуры второго и третьего порядка; 15 – разрывные нарушения; 16 – участки детальных работ (1 – Людмила, 2 – Тамара, 3 – Елена, 4 – Лариса)



и жерловых каналов — проявляются дугами и кольцевыми элементами дешифрирования. Крупная кольцевая структура второго порядка диаметром 9,5 км отражает пространственное размещение палеовулканической постройки сложного строения, а структуры меньшего диаметра указывают на размещение пород жерловой фации.

В рудном поле среди тектонических элементов преобладают северо-восточные (параллельные осевой части ОЧВП), северо-западные, субмеридиональные и субширотные. Спектральный анализ МКС позволил выделить и закартировать тела метасоматитов — вторичных кварцитов и пропилитов. Среди вторичных кварцитов различаются монокварцевые, преимущественно кварц-алунит-глинистые и существенно кварц-гидрослюдистые. В составе пропилитов преобладают хлоритовые разновидности. Форма тел монокварцевых метасоматитов значительно отличается в центральной и краевых частях рудного поля. Тела неправильной и слабовытянутой формы характерны для центральной части (месторождения Лариса, Елена), в то время как для краевых частей более характерны объекты линейной морфологии (месторождения Людмила, Тамара). Сопоставление полученных результатов дешифрирования метасоматитов с результатами наземных съемок (Мишин, 2011), выполненных в центральной и северной частях палеовулканической постройки, показал их весьма высокую сходимость.

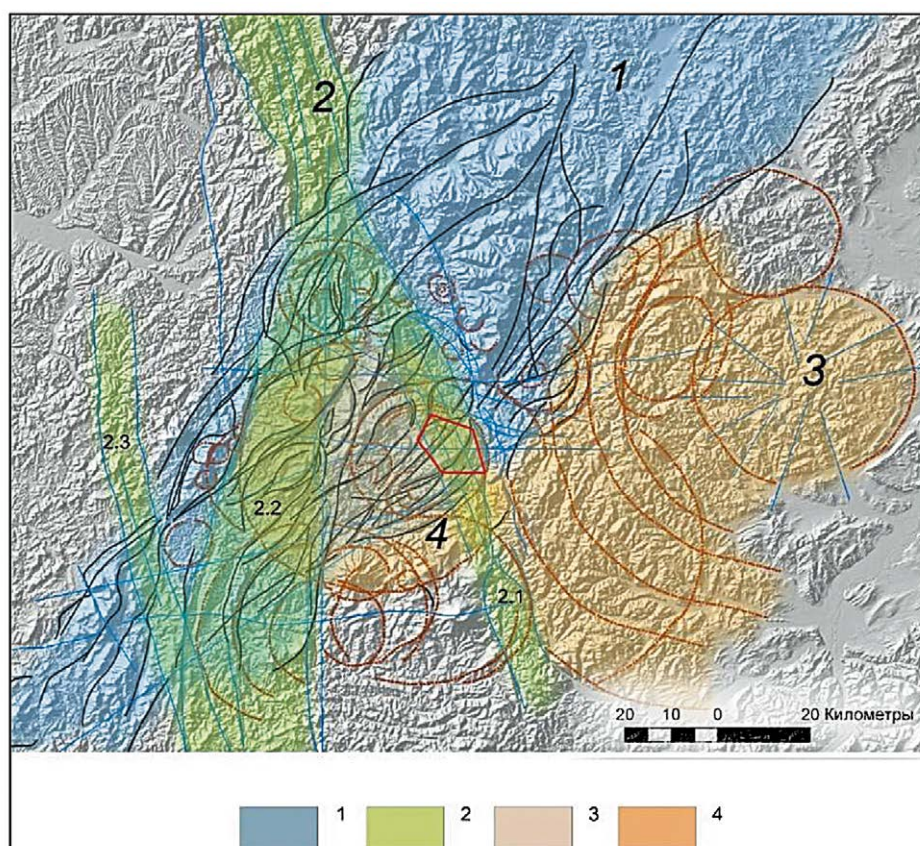


Рис. 9. Региональная структурная схема района Комсомольской площади на подложке цифровой модели рельефа

1 — Главная шовная зона; 2 — Северо-западная зона разрывных нарушений: 2.1 — девонский грабен, 2.2 — Центральный разлом, 2.3 — Юго-западная система разрывных нарушений; 3-4 — основные кольцевые структуры. Красный контур — Комсомольская площадь

Зоны гипергенной лимонитизации фиксируются в материалах спектрального анализа повышенными значениями параметров – «Железная шляпа» (*Gossan*) и «Трехвалентное железо» (*Ferriclron*) и отражают участки возможного развития зоны окисления первичных сульфидсодержащих руд (пород).

Результаты комплексного анализа МКС различного пространственного разрешения по западной части Ульяновского прогиба положены в основу многоуровневой дистанционной прогнозно-поисковой модели эпитермального *Au-Ag* оруденения.

**Ортон-Федоровский золоторудный район (Южная часть Кузнецкого Алатау)** в региональном плане располагается в зоне сопряжения двух крупных тектонических зон северо-восточного и субмеридионального простираения (Житков и др., 2013). Северо-восточная зона отвечает мезозональному типу структур с ярко проявленным фрактальным строением. Субмеридиональная зона нарушений, отвечающая зоне Кузнецко-Алтайского глубинного разлома, несет следы левосдвиговых хрупких деформаций (рис. 9).

Детальные исследования показали, что рудоносные структуры площади имеют северо-восточное простираение и представляют собой линейные зоны интенсивного динамометаморфизма, метасоматических преобразований с сопряженными линейно-штокверковым прожилкованием со стержневыми кварцевыми и кварц-карбонатными жилами (рис.10). Специальная обработка МКС позволила разработать модель Федоровско-

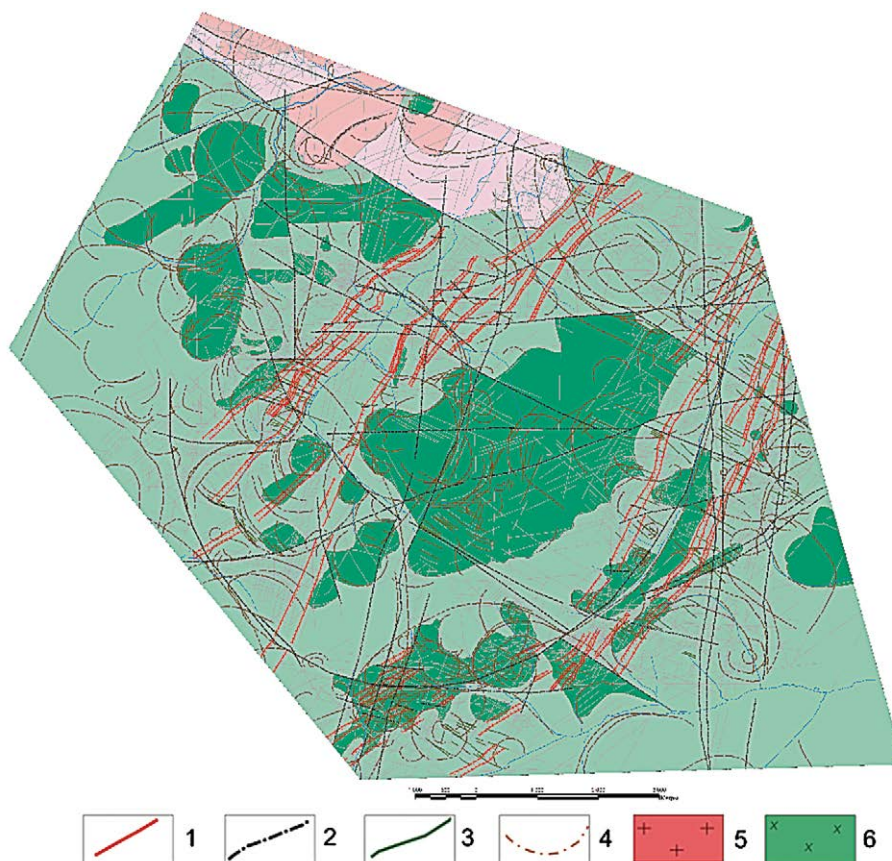


Рис. 10. Космоструктурная схема Комсомольской площади

1 – потенциально рудоносные зоны; 2 – разрывные нарушения; 3 – дайковые тела; 4 – кольцевые и дуговые структуры; 5 – гранитоидные интрузии; 6 – субвулканические тела кундустуюльского комплекса; 7 – западно-сибирская свита; 8 – мраморная свита

Кедровской рудоносной зоны, в которой на основе минеральных индексов выделяют: внутренняя серицит-мусковит-глинистая, промежуточная эпидот-хлорит-кальцитовая и внешняя железо-окисная минерально-индексные зоны.

Проведенные исследования позволили выявить структурную региональную позицию Комсомольской площади, детализировать особенности ее внутреннего строения и структурно-вещественные факторы контроля золотого оруденения.

### **Выводы**

Рудоносные образования различного иерархического уровня (провинция, район, узел, поле, месторождение, рудоносная зона), особенности их геологического и в том числе глубинного строения отчетливо проявляются в МКС.

Отмечаются общие космоструктурные критерии контроля рудных образований:

- кольцевые структуры различного диаметра, в том числе имеющие сложное телескопированное строение;
- радиальные зоны линеаментов и участки их сочленения с кольцевыми структурами;
- сочетание кольцевых и радиальных элементов, образующих в совокупности структуры очагового характера. Их комплексный анализ позволяет проводить реконструкцию развития геологических и в том числе рудообразующих процессов.

Важным направлением является спектральный анализ МКС, который позволяет выделять и картировать участки и зоны развития минеральных ассоциаций, сопровождающих рудоносные образования.

Выделяемые по материалам КС структурные и вещественные элементы служат объективной основой интерпретации данных геохимических, геофизических, минерагенических исследований и построения геолого-генетических моделей.

Анализ МКС целесообразно применять на всех этапах и стадиях геологоразведочных работ, не только в начале, но и в процессе их проведения. Это позволяет оптимизировать систему и повысить эффективность ГРР. Особенно это важно при ретроспективном анализе материалов ранее выполненных геологосъемочных, поисковых и разведочных работ.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1) Ананьев Ю.С., Житков В.Г., Поцелуев А.А. Прогнозно-поисковая модель эпипермальных *Au-Ag* месторождений кислотно-сульфатного типа по данным дешифрирования современных космических снимков (на примере рудного поля Светлое, Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 84-92.
- 2) Ананьев Ю.С., Поцелуев А.А., Житков В.Г. Позиция и тектонические структуры Уряхского рудного поля по данным дешифрирования современных космических снимков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 6, часть 2. – С. 260-264.
- 3) Ананьев Ю.С., Поцелуев А.А., Житков В.Г. Космоструктурные позиции золоторудных объектов заангарской части Енисейского кряжа // Известия ТПУ. – Т. 320, № 1. – 2012. – С. 38-47.
- 4) Аэрокосмические методы геологических исследований / Под ред. А.В. Перцова. – СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2000. – 316 с.
- 5) Житков В.Г., Поцелуев А.А., Ананьев Ю.С. и др. Структурная позиция Комсомольской площади Ортон-Балыксинского золотоносного района по материалам космических съемок // Развитие минерально-сырьевой базы Сибири: от Обручева В.А., Усова М.А.,

- Урванцева Н.Н до наших дней. Матер. Всеросс. форума с междунар. участием, посвящ. 150-летию акад. Обручева В.А., 130-летию акад. Усова М.А. и 120-летию проф. Урванцева Н.Н. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 169-174.
- 6) Казанский В.И. Геологическая позиция и история формирования Эльконского урановорудного района (Алданский щит, Россия) / В.И. Казанский, Е.П. Максимов // Геология рудных месторождений. – 2000. – Т. 42. – № 3. – С. 212-230.
  - 7) Мишин Л.Ф. Вторичные кварциты и их связь с золоторудной минерализацией месторождения Светлое (Россия) (Ульянский прогиб, Охотско-Чукотский вулканогенный пояс) // Тихоокеанская геология. – 2011. – Т. 30. – № 4. – С. 32-48.
  - 8) Несмеянова А.И., Березнев М.В. Геохимические поиски скрытых месторождений различных геолого-промышленных типов методом картирования сорбционно-солевых ореолов (КСО) // Геологический вестник «Производственные и методические аспекты геологоразведочных работ» (электронное издание АО «Полиметалл УК»), 2022. – № 12. – С. 139-149.
  - 9) Поцелуев А.А. Благороднометалльное оруденение в гидротермальных урановых и редкометалльных месторождениях Центральной Азии. Томск: STT. – 2014. – 292 с.
  - 10) Поцелуев А.А., Ананьев Ю.С., Житков В.Г. Дистанционные методы геологических исследований, прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых. Учебное пособие для вузов / Под ред. докт. геол.-мин. наук, проф. А.А. Поцелуева. – 3-е изд. – Томск. – 2019. – 192 с.
  - 11) Поцелуев А.А., Ананьев Ю.С., Житков В.Г., Новгородцев А.А., Митрофанов Е.А. Урановые и редкометалльные месторождения Сибири в материалах космических съемок / Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы VI Международной конференции (Томск, 20-24 сентября 2021 г.). В 2 томах. Том 1: – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2021. – С. 486-491.



# УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СПОСОБ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РУД

Руденко А.А.

АО «РУСБУРМАШ», Москва



Каждой стадии геологоразведочных работ соответствует определенный вид геотехнологических исследований параметров руд. Геотехнологические свойства изучают как в лабораторных условиях, так и в натуральных. Однако никакие лабораторные испытания не позволяют получить адекватные результаты. Поэтому при определенных условиях проведение натуральных испытаний на стадии предварительной и детальной разведок месторождений дают возможность получить реалистичные исходные данные, но для этого режим и качество опытных работ должны соответствовать наибольшей полноте получаемых результатов. Ниже рассмотрен предлагаемый новый универсальный способ натуральных испытаний геотехнологических свойств руд в условиях инфильтрационных месторождений.

## **Предшествующий уровень техники**

В настоящее время известен достаточно широкий спектр способов проведения полевых исследований с целью определения геотехнологических параметров руд для оценки возможности их эффективной отработки скважинным подземным выщелачиванием.

Известен способ полевого исследования геотехнологических свойств руд, включающий сооружение одной скважины, закачку в нее выщелачивающих растворов, их перемешивание, выстойку и откачку продуктивных растворов [1]. Недостатками данного способа являются получение только качественной информации о возможности растворения рудной минерализации, точечное опробование рудного тела без учета изменчивости продуктивности рудоносного пласта, отсутствие возможности получить динамические параметры по выщелачиванию руды.

Также известен способ исследования геотехнологических свойств водоносных рудовмещающих пластов, включающий лабораторные испытания руд, создание опытной ячейки из двух скважин – откачной и закачной, подачу в пласт выщелачивающего раствора, откачку продуктивного раствора с дебалансом от 4 до 10 в сторону откачки и прекращением откачки при уменьшении содержания урана ниже минимально допустимого по технологическим требованиям с учетом коэффициента дебаланса [2]. Недостатками данного способа являются: ограниченность его применения по геолого-гидрогеологиче-

ским условиям, в частности — только при наличии верхнего и нижнего водоупоров (плоскорадиальная фильтрация), когда коэффициент дебаланса возможно применять для расчета реальных содержаний металла в продуктивных растворах, а также только точечное изучение рудного тела без учета изменчивости продуктивности в пространстве. При отсутствии нижнего или верхнего водоупора или большой рудовмещающей мощности водоносного пласта, получение истинных содержаний металла в продуктивных растворах получить вообще невозможно в связи с подтягиванием пластовых вод к откачной скважине со всех сторон — как по плоскости, так и снизу и сверху водоносного пласта.

Наиболее близким способом к настоящему является способ натурных испытаний геотехнологических свойств руд с использованием многоскважинных ячеек — три закачных и 1 откачная, четыре закачных и одна откачная, с пятью, шестью и более закачными и от 1 до 3 откачными скважинами [3]. Основным недостатком известных опытных схем является получение геотехнологических параметров для усредненной продуктивности, что не позволяет прогнозировать процесс (время отработки, содержание в продуктивных растворах) отработки залежи с различной продуктивностью, что впоследствии влечет дополнительные эксплуатационные затраты.

Технический результат, достигаемый применением нового способа полевых исследований геотехнологических свойств руд, заключается в создании опытной ячейки технологических скважин, сооруженной с учетом продуктивности рудоносного пласта, тем самым обеспечивая получение геотехнологических параметров для одновременной, в дальнейшем, отработки добычных блоков с различной продуктивностью, что значительно повышает технологичность способа, одновременно снижая капитальные и оперативные затраты на добычу полезных ископаемых, а также натурального испытания эффективности окислителей на этапе закисления рудоносного пласта.

### **Осуществление способа**

Опытную ячейку для полевых исследований геотехнологических свойств, например, урановых руд сооружают на разведанной залежи, где оконтурены следующие продуктивности (рис. 1): средняя продуктивность составляет  $5 \text{ кг/м}^2$  (1),  $10 \text{ кг/м}^2$  (2) и  $15 \text{ кг/м}^2$  (3). Опытная ячейка состоит из откачной скважины (4), закачных скважин (5), которые располагают на разнопродуктивных участках залежи, и наблюдательных скважин (6), которые размещают на половине расстояния между закачной (5) и откачной (4) скважинами.

Расстояния между откачной и закачной скважинами на разнопродуктивных участках определяют по геотехнологической палетке [4] (рис. 2), задавая единую продолжительность отработки разновеликих по продуктивности участков рудоносного пласта по патенту РФ № 2 794 116, опубл. 11.04.2023, бюлл. № 11. Для продуктивности участка  $5 \text{ кг/м}^2$ , по геотехнологической палетке, при заданной продолжительности отработки участка в 5 лет, определяют оптимальное расстояние между откачной и закачной скважинами в ячейке, равное 32 м (1). Для продуктивности руды  $10 \text{ кг/м}^2$  — оптимальное расстояние между откачной и закачной скважинами составит 28 м (2), а для продуктивности  $15 \text{ кг/м}^2$  уже 25 м (3). В результате получим опытную ячейку для проведения полевых исследований геотехнологических свойств руд с дифференцированными расстояниями между закачными и откачной скважинами, которые учитывают изменение продуктивности рудоносного пласта.

Закисление ячейки начинают с одновременной подачи окислителей в рудоносный пласт (7), расположенного, как правило, между верхним и нижним водоупорами (8), все закачные скважины (5) и откачки растворов из откачной скважины (4) (рис. 1).

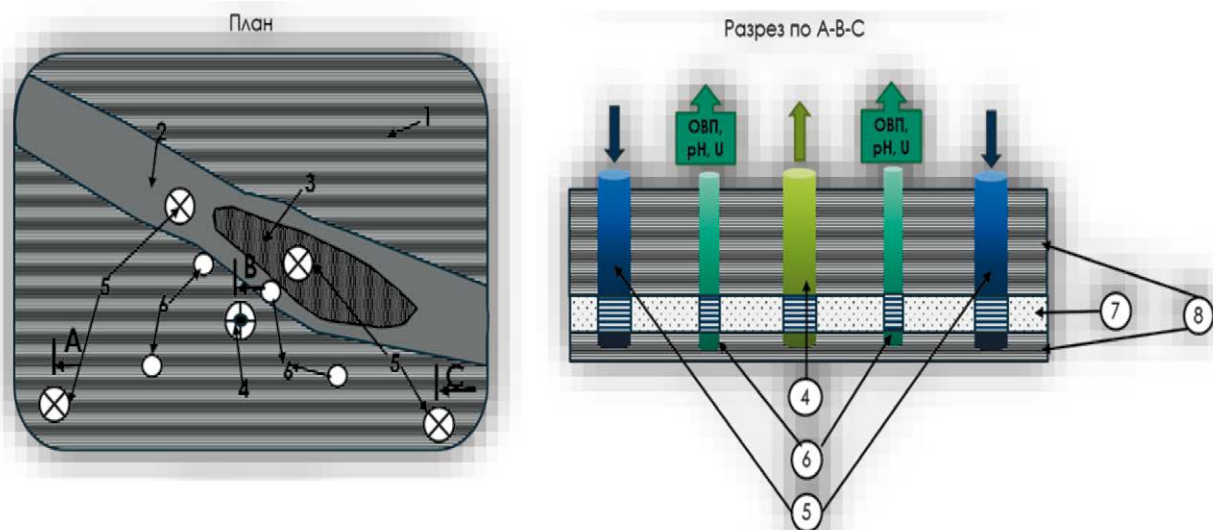


Рис. 1. План и разрез опытной ячейки

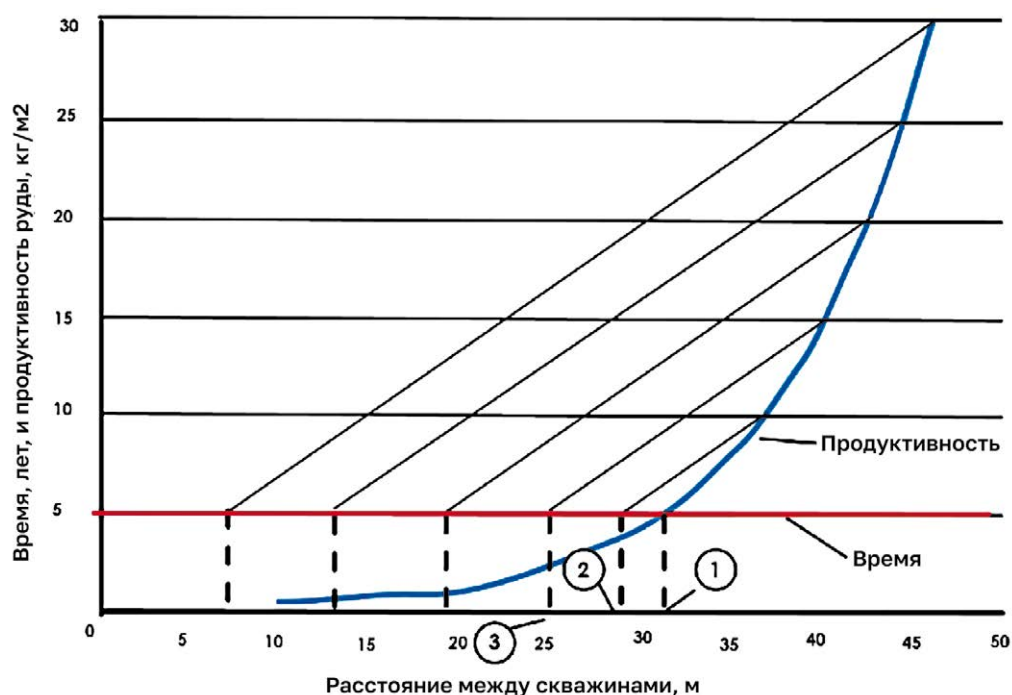


Рис. 2. Геотехнологическая палетка

В процессе опыта из наблюдательных скважин (6) отбирают пробы растворов на определение ОВП, pH и урана. На момент достижения ОВП 550-650 мВ и промышленно значимых содержаний урана отмечают продолжительность периода прохождения растворов половины расстояния от закачной (5) до откачной (4) скважины. Время подачи окислителя по каждой продуктивности удваивается и продолжается вторая часть этапа закисления рудоносного пласта (7). По истечении периода закисления окислитель прекращают подавать в закачные скважины (5) и продолжают опыт, подавая выщелачивающие сернокислотные растворы в закачные скважины (5) принятой концентрации – обычно 10-15 г/л,

и откачивая продуктивный раствор из откачной скважины (4). Опыт прекращают, когда извлечение металла достигает проектного уровня. Опыт может быть прекращен по отношению к какому-либо неэффективному окислителю, о чем будут свидетельствовать результаты анализов проб растворов из наблюдательной скважины. В этом случае подачу неэффективного окислителя прекращают, заменяя его на окислитель, показавший лучший результат за прошедшее время опыта. По окончании опыта на основании проведенных замеров и определений (содержание урана в растворе,  $pH$ , ОВП и др., дебиты откачки, дебиты закачки, времени закисления, площади закисления, объема горнорудной массы, концентраций окислителя, концентраций серной кислоты в выщелачивающем растворе) рассчитывают производные показатели процесса – извлечение, кислотоемкость, удельный расход окислителя и кислоты, Ж/Т, скорость выщелачивания и т.д. [5].

### **Эффективность**

Эффективность использования данного способа заключается в повышении качества получаемых геотехнологических параметров руд и гидродинамических показателей процесса выщелачивания, а также сокращение затрат на проведение полевых исследований геотехнологических свойств руд за счет унификации схемы опыта применительно к разнопродуктивным сортам руд и возможности одновременного испытания нескольких окислителей для интенсификации процесса выщелачивания руд.

При средней стоимости 1 скважины глубиной 200 м 2,0 млн руб. экономия, например, для схемы «Треугольник» (3 закачных, 1 откачная и 2 наблюдательные) составит: (3 продуктивности  $\times$  3 окислителя  $\times$  6 скважин)  $\times$  2,0 млн руб. – 2 млн руб.  $\times$  6 скважин = 96 млн руб., и это только на сооружении скважин без учета затрат на геотехнологическое и аналитическое сопровождение, затрат на электроэнергию, горюче-смазочные материалы и т.д. Все это в конечном итоге дает возможность сдать месторождение в эксплуатацию за гораздо меньшие сроки, получив не усредненные, а реальные параметры руд, что в свою очередь даст дополнительно определенный объем товарной продукции.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1) Патент РФ № 2066747 «Способ полевого исследования геотехнологических свойств руд» / Ю.В. Культин. – 1996.
- 2) Авторское свидетельство СССР № 735752 «Способ исследования геотехнологических свойств водоносных рудовмещающих пластов» / В.А. Грабовников. – 1977.
- 3) Бровин К.Г., Грабовников В.А., Шумилин М.В., Язиков В.Г. Прогноз, поиски, разведка и промышленная оценка месторождений урана для отработки подземным выщелачиванием. Алматы: Гылым. – 1997. – С. 296-306.
- 4) Патент РФ № 2 794 116 «Способ подготовки добычных блоков к скважинному подземному выщелачиванию полезных ископаемых» / А.А. Руденко, А.В. Гладышев, В.В. Данилейко, А.Е. Васюта. – 2023.
- 5) Патент РФ № 2 817 473. «Способ полевого исследования геотехнологических свойств руд» / А.А. Руденко. – 2024.

## ПОРТАТИВНЫЙ СПЕКТРОМЕТР *LIBS*: ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СОДЕРЖАНИЯ ЛИТИЯ В РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ПЕГМАТИТАХ

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

**Аннотация.** В условиях растущего мирового спроса на литий, критически важный элемент для производства аккумуляторов и высоких технологий, данное исследование представляет собой прорыв в области геологоразведки редкометальных гранитных пегматитов. Мы оцениваем качество анализа содержания лития с использованием передового портативного лазерного спектрометра *SciAps HH-LIBS* серии *Z900* на примере Колмозерского месторождения.

В работе представлены две инновационные методики: экспресс-анализ цельного керна скважин и анализ гомогенного материала. Сравнение полученных результатов с традиционными лабораторными данными, полученными методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой, демонстрирует хорошую корреляцию:  $r=0,62$  для цельного керна и высокую корреляцию  $r=0,96$  для «таблеток». Эти результаты подтверждают потенциал использования *LIBS* как полуколичественного инструмента для анализа цельного керна и как высокоточного метода для спрессованных проб.

Исследование подчеркивает не только эффективность, но и перспективность применения портативного лазерного спектрометра в разведке лития, открывая новые горизонты для оптимизации процессов оценки минеральных ресурсов в условиях современного рынка.

### Введение

Современные методы анализа содержания лития в редкометальных гранитных пегматитах играют ключевую роль в геологоразведке и оценке запасов этого важного элемента. Цель данного исследования заключалась в оценке качества анализа, проведенного с использованием портативного лазерного спектрометра, для определения содержания лития в редкометальных гранитных пегматитах на примере Колмозерского месторождения лития, а также в разработке методики анализа на исследуемом участке. Измерения осуществлялись с помощью портативного лазерного спектрометра *SciAps HH-LIBS* серии *Z900*. Исследование направлено на выявление возможностей применения технологии *LIBS* в разведке лития и улучшение точности анализа, что имеет важное значение для эффективной эксплуатации минеральных ресурсов.

В работе описаны две методики анализа образцов с использованием прибора *LIBS*, а также проведено сравнение полученных результатов с лабораторными данными, полученными методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Первый метод экспресс-анализа был направлен на исследование цельного керна скважин. Второй метод основан на анализе спрессованных в «таблетки» аналитических навесок проб. Для работы прибор *LIBS* был откалиброван на широкий диапазон значений содержания  $Li_2O$  от 0,06 до 3,6 масс.%.

По результатам работы первым методом экспресс-анализа произведено 4644 замера, вторым методом проанализировано 1150 проб. Показано, что при измерениях по цель-

ному керну скважин результаты дают корреляцию с лабораторными данными, выраженную коэффициентом корреляции  $r=0,62$ . В то же время по анализу «таблеток» прибор LIBS показывает хорошую корреляцию  $r=0,96$  с лабораторными данными.

При анализе цельного керна прибор LIBS может быть использован в качестве полук количественного инструмента для определения содержания лития. Однако второй подход позволяет использовать его в качестве количественного метода для анализа аналитических навесок.

Таким образом, применение портативного прибора LIBS для анализа керна представляет собой многообещающий подход в области разведки лития.

### **Актуальность темы**

Литий – самый легкий металл с высокой прочностью кристаллической решетки. Благодаря малому объемному радиусу он обладает выдающейся твердостью среди щелочных металлов. Литий легко образует сплавы с большинством металлов, за исключением железа, что расширяет его область применения [7].

Структура потребления лития и его соединений постоянно меняется (рис. 1). В последние годы наблюдается значительный рост спроса на литий, что обусловлено его ключевой ролью в производстве аккумуляторов. Литий-ионные батареи стали неотъемлемой частью портативных электронных устройств, электрических инструментов, электромобилей и систем накопления энергии. Это делает литий стратегически важным металлом для современных технологий [6].

Таким образом, литий занимает важное место в современных технологиях и промышленности. Его растущее использование в аккумуляторах, высоких технологиях и быту открывает новые горизонты для исследований и разработок. В условиях увеличивающегося спроса на литий важно продолжать изучение его свойств и возможностей применения в различных отраслях.

Производство лития в России значительно сократилось после распада СССР, упав с 1100-1300 т в начале 90-х до всего 97 т в кризисные 2008-2010 годы. В настоящее время Россия полностью зависит от импорта литиевого сырья [1].

В настоящее время добыча лития в промышленных масштабах в России не ведётся. На внутреннем рынке осуществляется лишь переработка импортного сырья, которое поставляется из Чили, Аргентины и Китая.

Однако в 2023 году начались проекты по разработке отечественных месторождений лития:

- «Полярный литий». Совместное предприятие ПАО «ГМК Норильский никель» и горнорудного дивизиона Государственной корпорации «Росатом» будет разрабатывать Колмозерское месторождение в Мурманской области. Предполагаемый объем – 45 тыс. т в год карбоната и гидроксида лития. Выход на проектную мощность – 2030 год;
- «Арктический литий». Совместное предприятие ООО «ТД Халмек» и АО «ХМЗ» будет разрабатывать Полмостундровское месторождение также в Мурманской области. В этом году добыча не превысит 1 тыс. т в эквиваленте карбоната лития, а с 2026 года увеличится до 20 тыс. т в год;
- извлечение лития из отвалов Завитинского месторождения в Забайкальском крае;
- добыча лития из пластовых рассолов. Планы по этому проекту есть у ПАО «Газпром» (на Ковыктинском месторождении) и у ООО «Иркутская нефтяная компания» (на Ярактинском месторождении);
- также ведутся разговоры о разработке месторождений лития в Республике Дагестан.



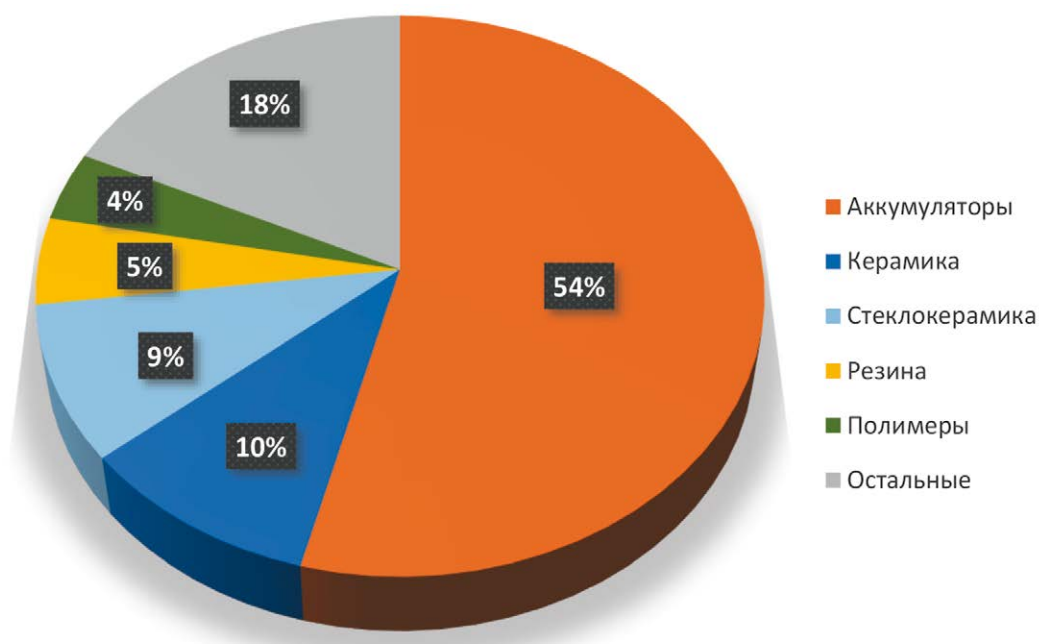


Рис. 1. Структура потребления литиевых продуктов по оценке на 2022 г.

### Краткий геологический очерк

Данное исследование проводилось на керне скважин Колмозерского литиевого месторождения редкометаллических пегматитов, где главным промышленным минералом лития является сподумен.

В пределах Колмозерского пегматитового поля (рис. 2) биотитовые гнейсы Мурманского блока прорываются Колмозерской многофазной дифференцированной интрузией, сложенной габбродиоритами, монцодиоритами и гранодиоритами, и интрузивными массивами габбро-анортозитов – Патчемварекского, Северного и других, меньших по площади, тел. Породы Колмозерского массива и метагаббро-анортозиты были деформированы и метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации [4]. Эти породы являются вмещающими для пегматитовых тел поросозерского комплекса.

В зоне контакта метагаббро с пегматитами встречается зона метасоматитов, сложенная хлоритовыми и холмквиститовыми сланцами. Согласно данным [2], эти сланцы являются продуктами гидротермального изменения метагаббро-анортозитов в процессе формирования пегматитов.

Состав пегматитов Колмозерского месторождения включает в себя кварц (30-35%), альбит (30-35%), микроклин (10-25%), сподумен (~20%) и мусковит (5-7%). Акцессорные минералы представлены бериллом, минералами группы колумбита, спессартином, апатитом, литиофилом, трифилином и турмалином. Всего на данном месторождении было выявлено 64 минеральных вида [2].

Пегматиты Колмозерского месторождения классифицируются по содержанию породообразующих минералов (кварца, альбита, микроклина, сподумена и мусковита): большую долю составляют сподуменовые (около 40%) и сподумен-полевошпатовые пегматиты (около 40%), за ними следуют кварц-альбитовые пегматиты (около 15%), в меньшей степени представлены альбитовые, кварц-сподуменовые и кварц-полевошпатовые пегматиты.

Структура преобладающих типов пегматитов неоднородная: в краевой зоне мелкозернистая, в центральной – пегматоидная и блоковая [4]. В целом пегматиты Колмозерского месторождения представлены грубозернистыми агрегатами.

Повышенное содержание лития в сподуменовых пегматитах очевидно, однако диагностика распределения лития в других типах пород в полевых условиях вызывает затруднения.

В данном исследовании пробы были изучены как из вмещающих пород, так и из пегматитовых жил. Количество проб по вмещающим породам составило чуть больше половины (рис. 3). Соответственно проб пегматитов было отобрано менее половины, однако среди них доля пегматитов сподуменового и сподумен-полевошпатового типов превысила 80%.

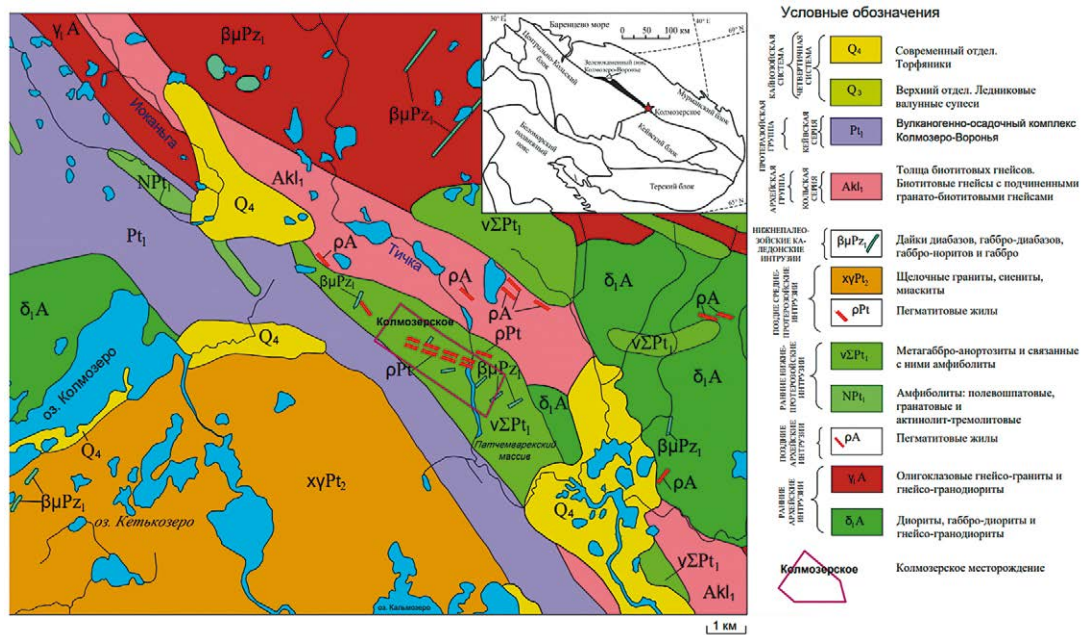


Рис. 2. Геологическая схема района исследования, составленная по государственным геологическим картам (листы Q-37-I,II, R-37-XXXI, XXXII)

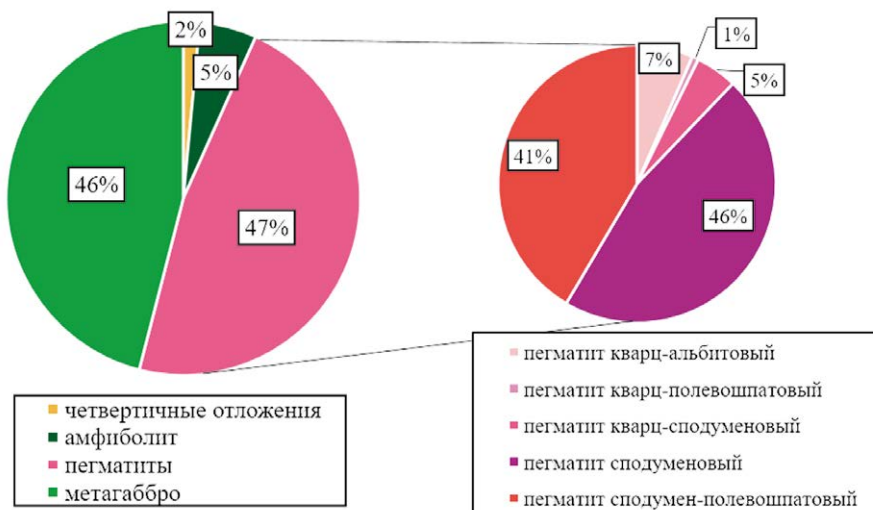


Рис. 3. Доля типов опробованных пород

### Обзор приборов для анализа содержания лития *in-situ*

Основной метод определения содержания лития в породе – лабораторно-аналитический метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП АЭС). Данный метод уже зарекомендовал себя как надежный, качественный и достоверный [3]. Для эффективного применения данного метода необходима тщательная подготовка образцов в лаборатории, которая требует немало времени.

Геологам зачастую необходимо в полевых условиях проводить оценку качества и количества полезных ископаемых. Для определения признаков литиевого сырья специалисты могут проводить первичную оценку на основании визуального осмотра образцов и их минералогического состава.

Существует всего несколько методов полевого определения содержания лития, одним из которых является геофизический метод нейтрон-нейтронного каротажа [8]. Этот способ позволяет определять литий в рапонасыщенных интервалах геологических разрезов скважин газоконденсатных месторождений.

В полевых условиях уже зарекомендовал себя портативный прибор РФА, однако данный метод имеет ограниченный диапазон определяемых элементов, в который, к сожалению, легкие металлы не попадают.

Портативная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия (*LIBS*) имеет более широкий диапазон определяемых элементов; в частности, его можно использовать для определения содержания легких элементов в горных породах.

Прибор *LIBS* позволяет проводить анализ геологических образцов в полевых условиях с использованием переносных анализаторов, таких, как *SciAps Laser Z*. Данный прибор применяется для определения химического состава материалов и включает в себя несколько ключевых этапов (рис. 4):

- 1) лазерное возбуждение: в *LIBS* используется мощный лазерный импульс, который фокусируется на поверхности образца. Этот импульс создает высокую температуру, что приводит к образованию плазмы – ионизированного газа;

- 2) формирование плазмы: в результате воздействия лазера на материал образуется микроскопическая область плазмы, которая содержит атомы и ионы образца;

- 3) эмиссия света: когда плазма остывает, атомы и ионы в ней возвращаются к более низким энергетическим состояниям, испуская свет в виде фотонов. Этот свет содержит информацию о химическом составе образца;

- 4) спектроскопия: излучение, полученное от плазмы, проходит через спектрометр, который разделяет свет на составляющие длины волн. Это позволяет получить спектр эмиссии, где каждая линия соответствует определенному элементу;

- 5) анализ данных: полученный спектр анализируется для определения элементов в образце. Каждая линия спектра соответствует уникальной длине волны, которая связана с конкретным элементом, что позволяет идентифицировать его присутствие и концентрацию.

Преимущества *LIBS* включают быстроту анализа, возможность работы с различными материалами (металлы, минералы, полимеры и др.). Портативные устройства позволяют проводить анализ в полевых условиях, что делает *LIBS* удобным инструментом для получения опережающих данных в различных отраслях промышленности, включая геологию, металлургию и экологический мониторинг.

Для определения лития *Laser Z* использует спектральные линии на длинах волн: 610.386 нм и 670.809 нм (больше подходит для концентрации  $<100 \text{ ppm Li}$ ). От произво-

дителя в приборе присутствовала внутренняя калибровка, позволяющая измерять содержания лития в пределах от 50 *ppm* до 10 000 *ppm*. Однако прибор позволяет анализировать больший диапазон при дополнительной калибровке [7].

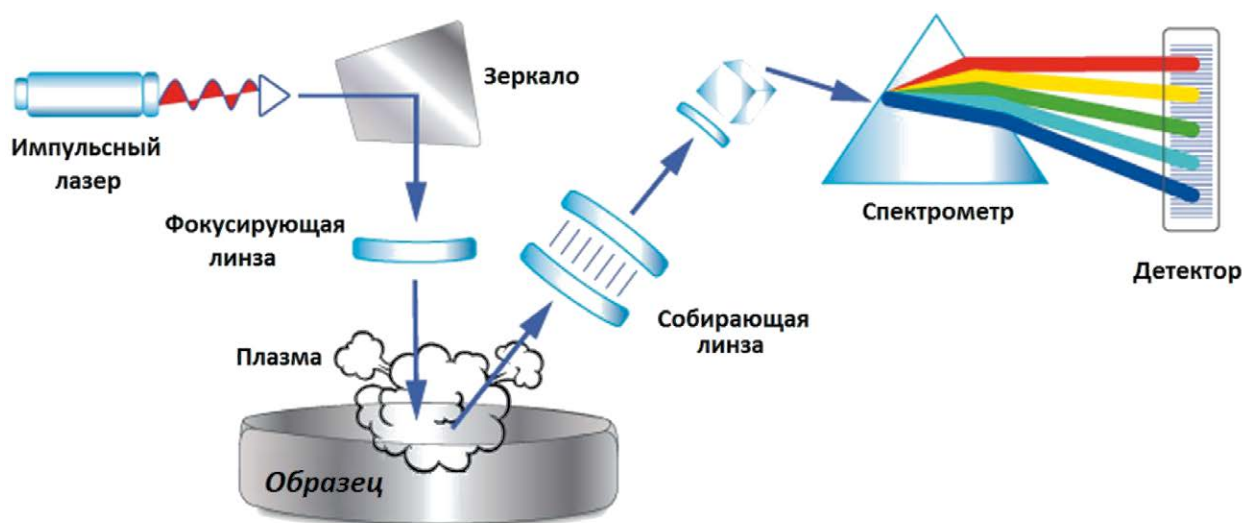


Рис. 4. Упрощённая схема устройства LIBS [7]

### Методика проведения анализа и подготовки образцов

На Колмозерском месторождении сотрудники ФГБУ «ВИМС» провели экспресс-анализ керна непосредственно на участке работ. В рамках исследования было предусмотрено непрерывное опробование керна скважин. Применение метода лазерной индуктивной эмиссионной спектроскопии (LIBS) позволило осуществить определение содержания лития в породе *in-situ*, что дало возможность не только определить содержание *Li* в рудных интервалах, но и установить его наличие во вмещающих породах.

Измерения были проведены портативным лазерным анализатором *SciAps HH-LIBS* серии Z900.

Для оценки качества анализа прибором LIBS результаты сравнивали с лабораторными данными (АЭС ИСП). Для сравнения содержания *Li ppm* с содержанием *Li<sub>2</sub>O мас. %* был использован переводной коэффициент 2.1525, полученный путем деления молекулярной массы оксида лития на массу лития с соблюдением стехиометрических коэффициентов.

#### Методика опробования

Экспресс-анализ прибором LIBS проведен двумя способами: точечные замеры по цельному керну с шагом 20 см — 5 точек на метр (**метод № 1**). Поскольку пегматиты имеют крупно-гигантозернистую структуру, для подтверждения достоверности полученных результатов были проведены замеры аналитических навесок (**метод № 2**), изготовленных путем дробления и гомогенизации керновых проб из интервалов опробования. Схематическое изображение керна с разметкой опробования и точек замеров приведено на рисунке 5.

#### Метод анализа № 1: точечные замеры

Общий объем измерений содержания лития с использованием LIBS по цельному керну 8 скважин составил 4644 точки с шагом в 20 см.

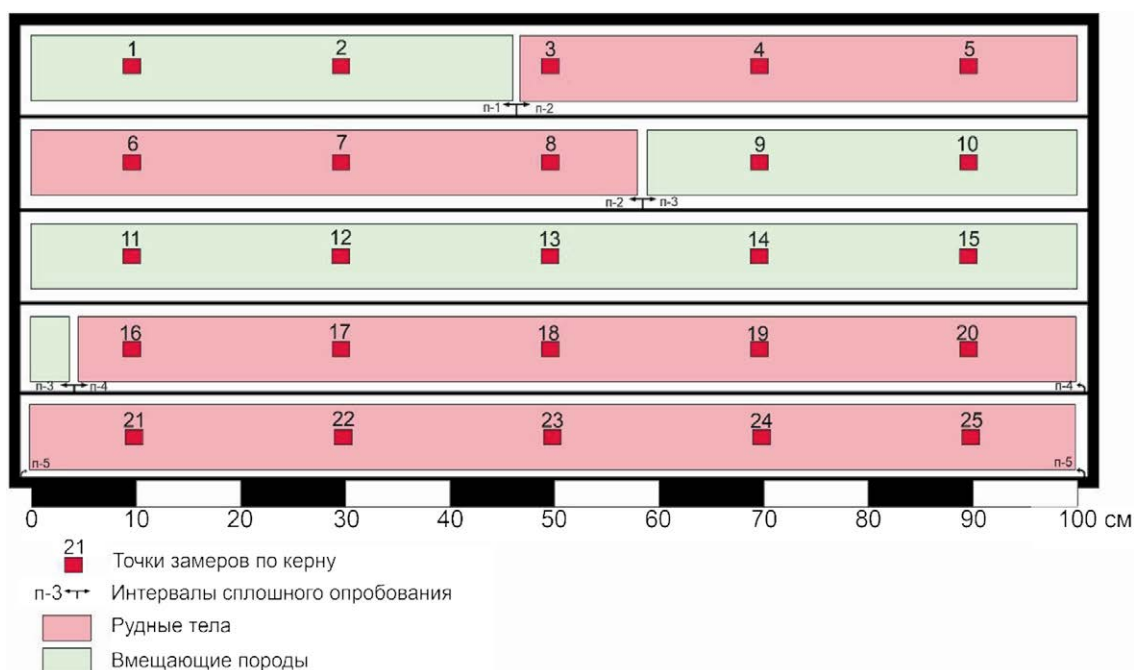


Рис. 5. Схематическое изображение керна с точечными замерами и сплошным опробованием

В связи с тем, что лабораторные измерения, используемые для оценки качества экспресс-анализа, проводились в рамках определённых интервалов опробования, полученные данные были усреднены по указанным интервалам. Длина этих интервалов зависела от литологических границ и варьировалась от 0,5 до 1,5 метров, при этом средняя длина пробы составила 1 метр. Соответственно, количество точечных замеров в пределах одного интервала опробования колебалось от 2 до 7 точек.

#### *Метод анализа № 2: измерения по интервалам опробования*

Общий объем замеров прибором *LIBS* по аналитическим навескам составил 1135 проб по 11 скважинам, среди которых 599 проб по вмещающим породам и 536 проб – по пегматитам.

Поскольку анализатор *LIBS* не предназначен для работы с рыхлыми порошкообразными материалами, из аналитических навесок методом прессования были изготовлены «таблетки», на которых и проводились измерения. Подготовка проб проводилась в полевых условиях сразу после геологического описания керна, керновые пробы были измельчены до фракции 0,074 мм и гомогенизированы.

#### *Подготовка прибора LIBS*

Перед началом работы с *LIBS* сотрудниками лаборатории поисковой минералогии ФГБУ «ВИМС» была проведена калибровка прибора.

Калибровка выполнена по 17 пробам с известным содержанием  $Li_2O$  от 0,06 до 3,6 масс.%. Калибровка выстроена по пику лития 610 нм и нормирована на алюминий, кислород, кремний и кальций. Калибровка *LIBS* показала хорошую корреляцию ( $r=0,985$ ) по эталонным образцам (рис. 6).

Для уменьшения влияния ошибки прибора по каждому образцу была проведена серия из 10 замеров. Было установлено, что первый из серии замеров всегда выдает большую ошибку, чем все последующие замеры. Рекомендовано при проведении работ выполнять не менее 4 замеров для минимизации погрешности прибора.

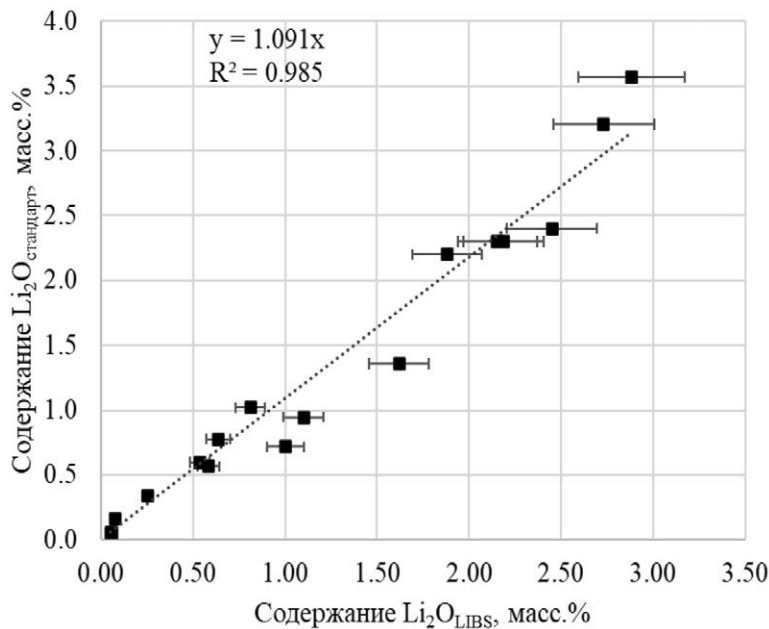


Рис. 6. Диаграмма рассеяния для содержаний  $\text{Li}_2\text{O}$  масс. % по лабораторным данным и результатам измерения прибором LIBS

## Результаты и обсуждение

### Результаты по методу № 1

На рисунке 7 показана корреляция между содержаниями  $\text{Li}_2\text{O}$  масс. %, полученных прибором LIBS по цельному керну, и результатами лабораторных исследований ИСП АЭС. На графике результаты разделены по типам пород, вынесена линия равных значений, линия тренда, а также границы доверительного интервала  $3\sigma$ , в которые попадает 99,7 % результатов. На диаграмме остатков показано распределение отличное от нормального, гистограмма имеет явную отрицательную асимметрию.

В проведенном исследовании была выявлена корреляция между результатами измерений содержания лития (Li), выраженная коэффициентом корреляции  $r=0,62$ . Данная корреляция сопровождается значительным разбросом точек, что указывает на вариативность данных.

Проверка по статистическому критерию значимости при 95 % уровне доверия показала, что по таблице критических точек распределения Стьюдента выборочное значение является статистически значимым. Из чего следует, что данный подход можно признать полуколичественным.

Наибольшее количество точек, выходящих за пределы  $3\sigma$ , а также с заниженными значениями по LIBS, было зафиксировано для пегматитов с повышенными содержаниями лития, в частности, для сподуменового и сподумен-полевошпатового типов. Предполагается, что данный разброс может быть обусловлен крупнозернистой или пегматоидной структурой пегматитов (рис. 8), где основным минералом лития является сподумен, которого в сподуменовых пегматитах в среднем содержится 7 %, а основная масса представлена кварц-полевошпатовым агрегатом.

Следует отметить, что измерения в данном подходе проводились скорее по крупным зернам породообразующих минералов. Данный подход отражает не среднее содержание лития в породе, а, скорее, среднее содержание в отдельных минералах. В связи с этим оценка качества анализа, проведенного с использованием прибора LIBS по неоднородной породе путем сравнения его результатов с данными лабораторных исследований по гомогенизированным пробам, является некорректной.



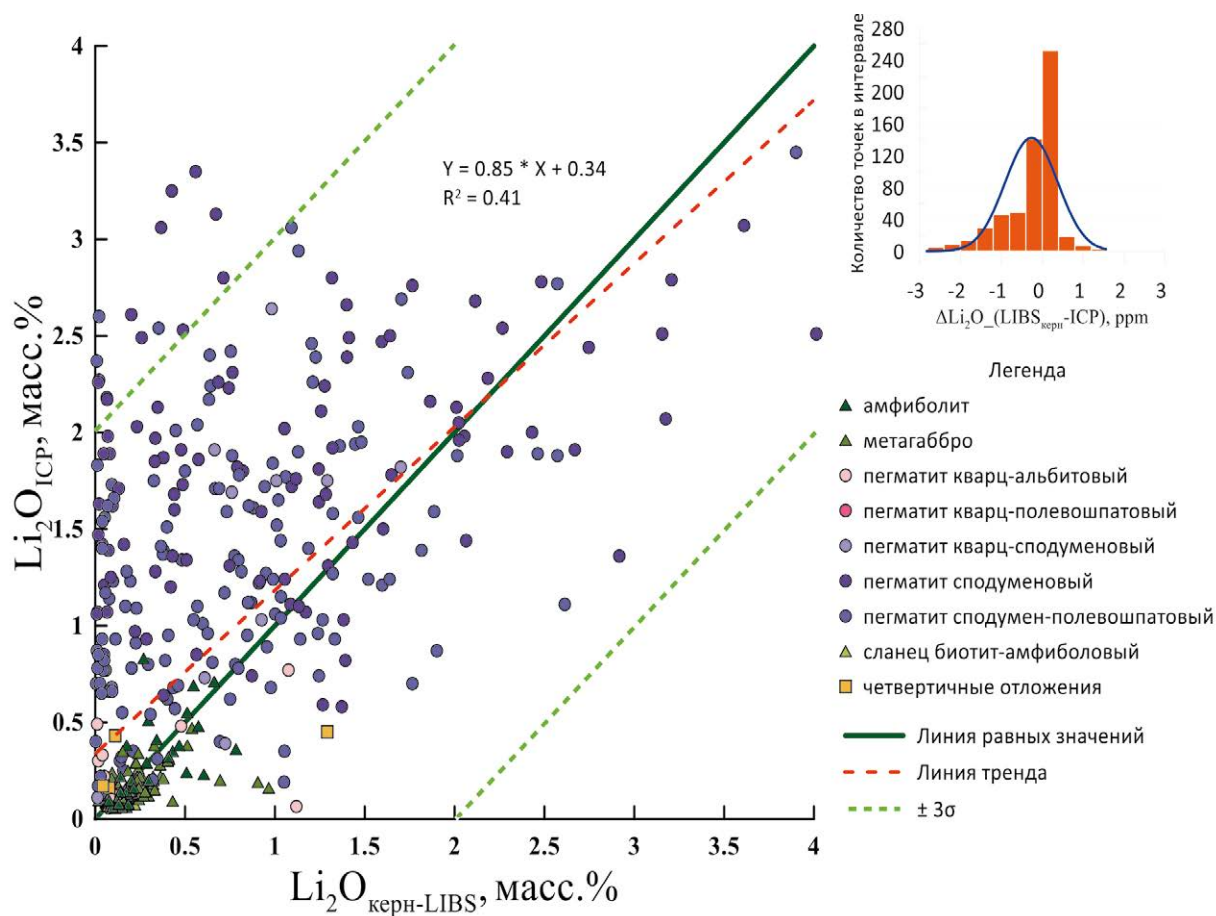


Рис. 7. Сравнение результатов измерения  $\text{Li}_2\text{O}$  прибором *LIBS* по цельному керну с лабораторными данными ИСП



Рис. 8. Пример сподумен-полевошпатового пегматита с крупнозернистой текстурой и нанесенной схемой точек измерений прибором *LIBS*

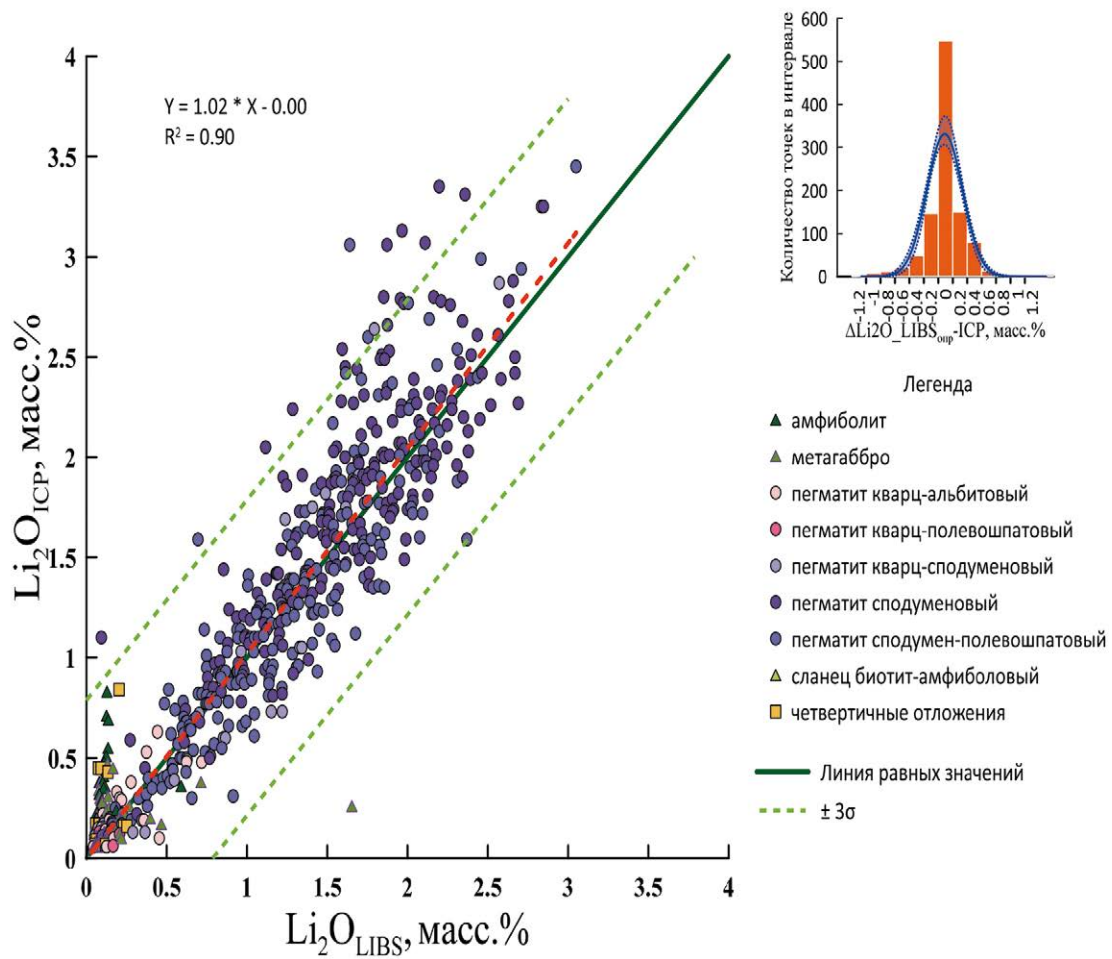


Рис. 9. График сравнения результатов измерения  $Li_2O$  прибором *LIBS* по навескам с лабораторными данными *ICP*

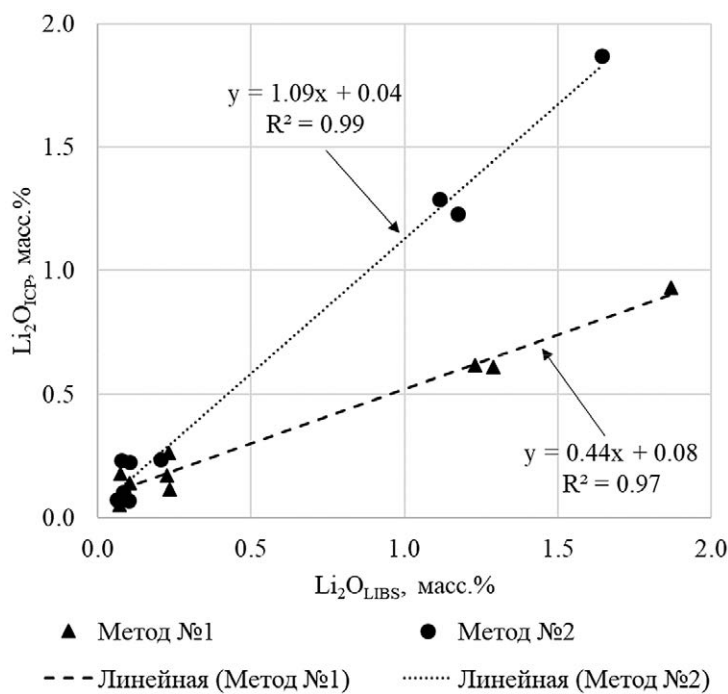


Рис. 10. Сравнение результатов исследований по двум методам на приборе *LIBS*

*Результаты по методу № 2*

На графике (см. рис. 9) показано сравнение результатов измерения  $Li_2O$  прибором *LIBS* по навескам с лабораторными данными ICP. Сопоставление полевых и лабораторных результатов показывает их хорошее соответствие, о чем свидетельствует близость угловых коэффициентов в уравнениях регрессии к единице, свободных членов — к нулю, близкие к единице значения коэффициентов детерминации ( $r=0,95$ ).

Полученные результаты говорят о хорошей степени достоверности полученных данных. И свидетельствуют о пригодности метода анализа прибором *LIBS* спрессованных в таблетки аналитических навесок в качестве количественного метода анализа содержания лития.

Сравнение результатов двух методов (см. рис. 10) по определению среднего содержания лития в каждом типе пород показало, что опробование по цельному керну (метод № 1) дает сильное занижение среднего содержания лития в пегматитах с высокими содержаниями (со сподуменом) относительно лабораторных данных (ICP). В то же время значения корреляции, полученные при анализе по аналитическим навескам (метод № 2), значительно лучше.

**Выводы**

Данное исследование подтвердило целесообразность применения портативного лазерного анализатора *LIBS* для определения содержания лития в редкометальных гранитных пегматитах. Проведенные измерения с использованием прибора *SciAps HH-LIBS* серии *Z900* позволили разработать методику анализа как цельного керна скважин, так и спрессованных аналитических навесок.

Портативный анализатор *LIBS* оказался эффективным инструментом для количественного определения содержания лития в редкометальных гранитных пегматитах, что открывает новые перспективы для геологоразведочных работ.

Прибор *LIBS* при правильной подготовке может быть успешно применен для количественного анализа содержания лития *in-situ* по цельному керну, что значительно упрощает процесс получения опережающих данных.

Кроме того, прибор *LIBS* подходит для количественного анализа содержания лития в спрессованных аналитических навесках, что расширяет его применение в лабораторных условиях.

Портативное устройство *LIBS* предоставляет возможность получения опережающих данных непосредственно в полевых условиях, что делает его незаменимым инструментом для геологов и исследователей. Использование портативного анализатора *LIBS* для качественного и количественного анализа керна представляет собой перспективный инструмент в области разведки лития.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 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) Гордиенко В.В. Минералогия, геохимия и генезис сподуменовых пегматитов. — Недра. Ленингр. отд-ние, 1970. — 239 с.
- 3) Зак А.А., Шабанова Е.В., Васильева И.Е. Точность результатов одновременного определения *Na*, *K*, *Li*, *Rb* и *Cs* в геохимических объектах методом пламенной атомно-эмиссионной спектроскопии // Аналитика и контроль. — 2021. — Т. 25. — № 1. — С. 6-19.

- 4) Морозова Л.Н. Колмозерское литиевое месторождение редкометалльных пегматов: новые данные по редкоэлементному составу (Кольский полуостров). – 2018. – № 18(1). – С. 82-98.
- 5) Саркаров Р.А., Белан С.И., Гусейнов Н.М. Оценка современного состояния и перспективы добычи лития и его соединений в России // Индустриальная экономика. – 2022. – Т. 1. – № 2. – С. 57-68.
- 6) *Harmon R. S., Wise, M. A., Curry, A. C., Mistele, J. S., Mason, M. S., & Grimač, Z. Rapid analysis of muscovites on a lithium pegmatite prospect by handheld LIBS // Minerals. – 2023. – Т. 13. – № 5. – С. 697.*
- 7) URL: <https://www.sciaps.com/>, дата обращения 14.01.2025.
- 8) Патент RU 2 771 438 C1 «Способ определения лития в рапонасыщенных интервалах геологических разрезов скважин газоконденсатных месторождений по данным мультиметодного многозондового нейтронного каротажа» / С.А. Егурцов, А.И. Лысенков, Ю.В. Иванов, С.К. Ахмедсафин, С.А. Кирсанов. – 2021.09.20.

## **К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРАНАТОВ ЭКЛОГИТОВОГО ПАРАГЕНЕЗИСА ПРИ ШЛИХО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ**

*Саблуков С.М., Саблукова Л.И.*  
*ООО ИНПК «РУСГЕО»*

В настоящее время на мировом рынке ювелирных алмазов происходит процесс постепенного и как будто бы неуклонного вытеснения природных (естественных) алмазов искусственными, затраты на выращивание которых уменьшаются день ото дня. Это приводит к падению спроса на природные алмазы и, соответственно, к проблемам развития и даже существования алмазодобывающих компаний. На наш взгляд, эта жёсткая конкуренция ювелирных природных и выращенных алмазов – временное и искусственно созданное явление, вызванное грамотной, по-молодому напористой маркетинговой политикой производителей алмазов с одной стороны, и полным провалом рекламных компаний старых, усталых алмазодобывающих организаций, действующих по принципу «и так сойдёт». В ближайшей перспективе (чуть раньше или чуть позже) у покупателя неизбежно восторжествует притяжение и благоговейное отношение к естественному алмазу, как к древнейшему (3 млрд лет!) и уникальнейшему, единственному в своём роде и неповторимому чуду Природы, пришедшему к нам из огромных, недоступных глубин Планеты (150-700 км!) на фоне машинного, конвейерного производства в соседнем здании однообразных, банальных искусственных «стекляшек», пусть и имеющих тот же углеродный состав. Примером простого и естественного разрешения подобных противоречий является и отношение покупателя, и резкая разница в стоимости ювелирных изделий из природных рубинов (мало отличающихся по цене от алмазов) и искусственно выращенных корундов, изделия из которых заняли нишу дорогостоящей бижутерии. Такую же нишу – дорогостоящей бижутерии – со временем неизбежно займут изделия из искусственных, выращенных алмазов. А потребность покупателя в обладании настоящей роскошью природных алмазов будет только расти так же, как будет расти и цена природных алмазов, в том числе и из-за постепенного истощения запасов имеющихся месторождений, а также всё большего усложнения и удорожания процесса поисков месторождений новых. Поэтому усовершенствованию методики поисков так необходимых новых месторождений алмазов уделяется и будет уделяться повышенное внимание и в России, и в Море.

В России уже долгое время существует проблема воспроизводства запасов алмазов из-за постоянного «выбытия» имеющихся балансовых запасов в результате промышленного освоения известных богатых, но не бесконечных месторождений Якутии и Архангельска при отсутствии открытия новых месторождений вот уже в течение 29 лет (не считая открытия небольшой по запасам трубки Майская в Накынском поле Якутии в 2006 г.). Хотя интенсивность поисковых работ на алмазы не снижается, а затраты на такие работы только растут. Подобная низкая эффективность поисковых работ связана с тем, что все легкодоступные месторождения давно открыты, и поиски месторождений алмазов вынужденно проводятся на площадях сложного геологического строения – на «закрытых территориях», в том числе на площадях с развитием покровов высокомагнитных базаль-

тов или почти непредсказуемых по строению покровных ледниковых отложений. Кроме того, наиболее значимые месторождения алмазов слабо выделяются (а чаще даже совсем не выделяются) имеющимися современными поисковыми методами ни в геофизических, ни в геохимических полях. В таких условиях особое (даже решающее) значение имеет шлихо-минералогический метод поисков алмазных месторождений как при бурении перспективных площадей по регулярной сети скважин, так и при заверке бурением локальных низкоинтенсивных геофизических аномалий.

Основой шлихо-минералогического метода поисков является изучение типоморфизма (особенностей морфологии и химического состава), а также характера распределения по площади и разрезу поискового участка минералов-спутников алмаза пиритового (ультраосновного) парагенезиса, преимущественно пикроильменита и пироп-альмандин (красно-фиолетовой, редко сине-зелёной цветовой гаммы), иногда хромшпинелида, в качестве возможного дополнения – хромдиоксида и оливина. При этом время от времени высказывается мнение о необходимости использования при поисках также и минералов эклогитового (основного) парагенезиса – прежде всего оранжевого граната, пироп-альмандин. В частности, на необходимости такого использования настаивало геологическое руководство АК «АЛРОСА», которое отказалось от предлагаемой нами инновационной методики шлихо-минералогических поисков, не учитывающей распределение зёрен пироп-альмандин эклогитового парагенезиса. Формальные основания для такого подхода очень серьёзные. Минералы эклогитов широко распространены в кимберлитовых месторождениях алмазов, а в некоторых месторождениях среди алмазов резко преобладают алмазы именно эклогитового парагенезиса (например, трубка Орапа, Ботсвана, трубки Накынского поля, Якутия). Однако использование оранжевого пироп-альмандин в качестве минерала-спутника алмаза сильно затруднено, и в практике шлихо-минералогических поисков месторождений алмазов практически не применяется, что принимается минералогами-алмазниками интуитивно, «априори». Для этого имеются, по крайней мере, три причины, которые могут обозначить авторы на основании всестороннего изучения около 400 тел кимберлитов и родственных пород (включая коры выветривания), более 6000 образцов мантийных ксенолитов (в том числе эклогитов) из кимберлитов и анализа многих десятков тысяч шлиховых проб, отобранных в самых разных геолого-геоморфологических обстановках разных районов России и Мира, а также многочисленных зёрен минералов-спутников алмаза.

**Причина 1.** По внешнему облику мантийные оранжевые пироп-альмандины эклогитового парагенезиса из кимберлитов практически не отличаются от коровых гранатов из метаморфических пород, поэтому их визуальная диагностика и выделение при минералогическом анализе тяжёлой фракции шлиховых проб крайне затруднены, если вообще возможны, и в районах развития ледниковых отложений (рис. 1), и даже в кимберлитах с обильными включениями гранат-содержащих кристаллических сланцев и гранулитов.

**Причина 2.** Оранжевые пироп-альмандины эклогитового парагенезиса в широко развитых корах выветривания кимберлитов в первую очередь сильно, иногда практически полностью растворяются, поэтому в перекрывающие терригенные породы промежуточных коллекторов не поступают и не могут быть использованы в поисковых целях.

**Причина 3.** Изоморфная ёмкость граната (пироп-альмандинового состава) гораздо меньше, чем у сосуществующего с гранатом клинопироксена, вследствие чего очень близким химическим составом могут обладать гранаты, имеющие совершенно разное происхождение по петрологическому типу пород и условиям образования (в том числе





Рис. 1. Внешний вид электромагнитной фракции шлиховых проб из района развития ледниковых отложений Архангельской области, класс крупности -1+0,5 мм

*P-T* параметрам). Это не позволяет уверенно идентифицировать такой гранат как имеющий глубинное (кимберлитовое) происхождение даже при определении его химического состава, а значит, и не позволяет использовать такую находку в поисковых целях.

Далее рассмотрен пример сопоставления химического состава сосуществующих оранжевого граната (пироп-альмандин) и клинопироксена из четырёх совершенно разных типов пород одного небольшого района — Зимнебережного кимберлитового района Архангельской алмазоносной провинции.

*Тип 1.* Ксенолиты эклогитов группы «В» [6, 8] из кимберлитов трубок Золотицкого куста (месторождение им. М.В. Ломоносова), трубок Пачугского куста и трубки им. В. Гриба (месторождение им. В.П. Гриба).

*Тип 2.* Галька эклогита из аллювия среднего течения реки Пачуга, размывающей четвертичные ледниковые отложения (точка между трубками Чидвинского куста и трубками Пачугского куста). Судя по свежести минералов и средней степени окатанности, этот образец перемещён ледниковыми процессами с Балтийского щита.

*Тип 3.* Сростки и микрообломки пород из шлиховых проб аллювиальных отложений Летнеозёрской площади с парагенезисом: *gar+cpx +/- opx, amph, plag, ru*. Судя по минеральным парагенезисам и составу минералов (прежде всего, по присутствующему в сростках хромомфациту), эти сростки представляют собой перемещённые ледниковыми процессами микрофрагменты древних сложнопостроенных метасоматизированных базит-гипербазитовых метаморфических комплексов. Примером может служить Марункеусская структура на Полярном Урале, район Слюдяной Горки, где в составе комплекса участвуют разнообразные по генезису породы от ультраосновного до кислого состава, тесная перемежаемость которых создает своеобразный «слоеный пирог» [5]. На сегодняшний день микроксенолиты подобного состава в кимберлитах Зимнего Берега не обнаружены. Поэтому изученные микрообломки пород относятся по происхождению к некимберлитовым коренным источникам.

*Тип 4.* Включение деформированного эклогита мозаично-порфиробластической структуры (гранатового клинопироксенита?) из отложений урзугской свиты среднего

карбона (?) над кимберлитовой трубкой Поморская Золотицкого куста (месторождение им. М.В. Ломоносова). Судя по тому, что в кимберлитах Зимнего Берега среди тысяч ксенолитов ни одного сколько-нибудь похожего образца обнаружено не было, нельзя исключить вероятность того, что этот образец может представлять собой фрагмент (перемещённый щебень) ещё не обнаруженного магматического объекта. Но полностью нельзя исключить и возможность перемещения этого образца с Балтийского щита.

Во всех этих четырёх типах изученных пород оранжевый гранат имеет сходный состав и относится к гранатам эклогитов группы «IB» (алмазоносные эклогиты) и «IIB» (неалмазоносные эклогиты) [6, 8] (рис. 2), при этом состав клинопироксена меняется в очень широких пределах, что подчёркивает большую изоморфную ёмкость клинопироксена по сравнению с гранатом. Это хорошо видно на графиках, на которых показаны интервалы (пределы) колебания частных значений содержания оксидов в гранатах и клинопироксенах всех изученных типов образцов, нормированные к среднему составу соответствующих минералов из включений эклогитов группы «B» в кимберлитах Мира [4] (рис. 3).

На рисунке 4 хорошо видно, как сильно может меняться состав клинопироксена в парагенезисе с практически однотипным по составу гранатом (пироп-альмандином): от типичного омфацита в эклогитах из кимберлитов (тип 1) до хромдиопсида в гальке эклогита из аллювия (тип 2), хромдиопсида и хромомфацита в сростках минералов из аллювия (тип 3) до авгита, субкальциевого авгита и даже магнезиального пижонита в клинопироксените из среднего карбона (тип 4) (рис. 4).

| Тип | Образец                                                                             | SiO <sub>2</sub>        | TiO <sub>2</sub>     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | sFeO                    | MnO                  | MgO                    | CaO                   | Na <sub>2</sub> O |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|
| 1   |  | 39,16<br>40,21<br>40,02 | 0,35<br>0,03<br>0,05 | 20,57<br>22,59<br>22,34        | 0,03<br>0,08<br>0,02           | 18,37<br>19,76<br>19,86 | 0,43<br>0,30<br>0,41 | 8,84<br>10,76<br>10,93 | 11,98<br>7,10<br>6,59 | —<br>—<br>—       |
| 2   |  | 39,41                   | 0,05                 | 22,70                          | 0,00                           | 18,28                   | 0,53                 | 12,04                  | 6,65                  | 0,00              |
| 3   |  | 40,98                   | 0,00                 | 22,56                          | 0,08                           | 17,57                   | 0,62                 | 15,20                  | 3,72                  | —                 |
| 4   |  | 39,53                   | 0,06                 | 22,56                          | 0,03                           | 18,12                   | 0,72                 | 12,69                  | 6,10                  | 0,08              |

Рис. 2. Химический состав граната из разных типов изученных пород (масс. %) по данным рентгеноспектрального микроанализа (пояснения в тексте)

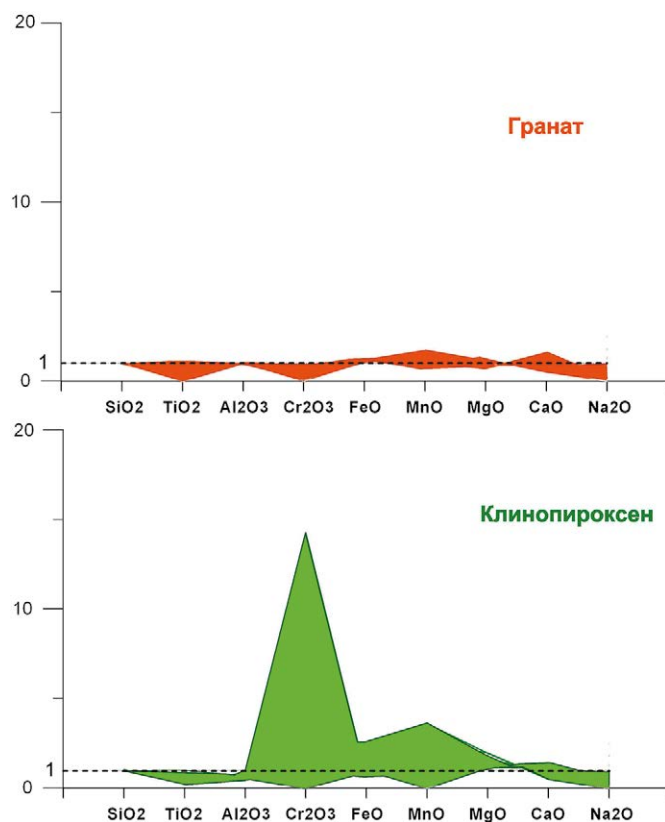


Рис. 3. Интервалы колебания частных значений содержания оксидов в минералах по изученным типам образцов, нормированные к среднему составу минералов из включений эклогитов группы «В» в кимберлитах Мира [4]

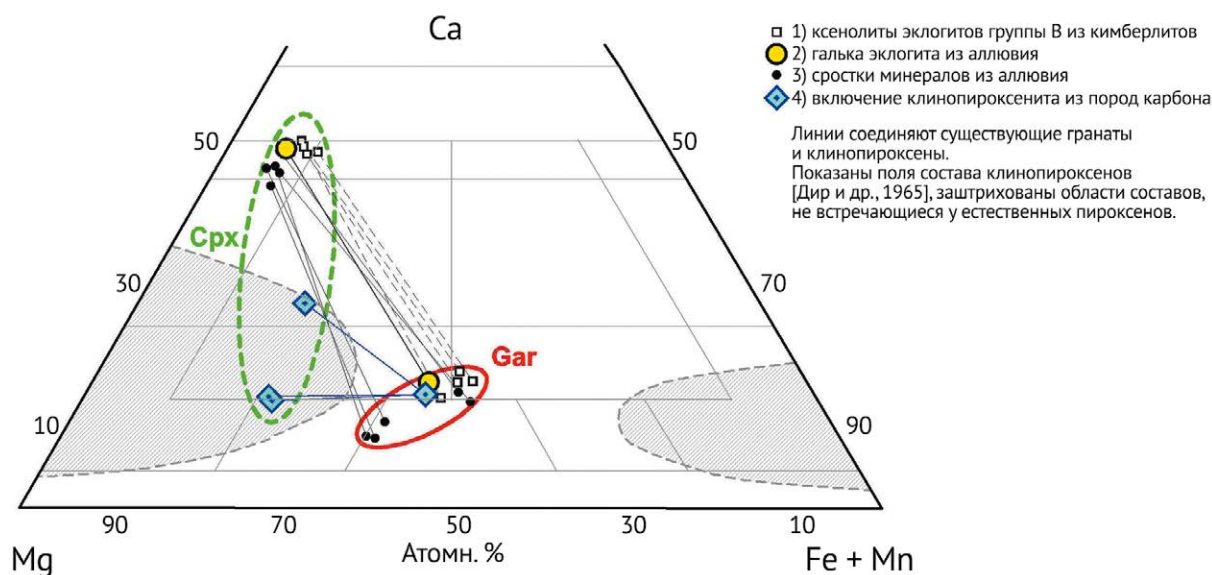


Рис. 4. Химический состав сосуществующих гранатов и клинопироксенов из разных типов изученных пород в координатах содержаний атомов  $Ca$ ,  $Mg$  и  $(Fe+Mn)$  (Диаграмма [1])

Расчёт температуры и давления образования изученных типов пород по составу мономинерального клинопироксенового термобарометра показывает значения: 600-1340 °C и 10-28 кбар [7], а по парагенезису минералов клинопироксен+гранат — необычно высокие значения  $TP$ -параметров: 650-1640 °C и 24-88 кбар [2]. Возможно, полученные по формальным расчётам экстремально высокие значения  $TP$ -параметров не полностью

соответствуют реалиям (из-за имеющихся ограничений применения термобарометров и/или из-за неравновесности парагенезиса клинопироксен+гранат в образце), но в любом случае они показывают на очень широкий разброс *TP*-параметров и условий образования изученных типов пород.

Такое широкое разнообразие состава клинопироксена в парагенезисе с однотипным по составу гранатом – пироп-альмандином основного парагенезиса, указывает на совершенно разные геологические условия образования изученных пород, в том числе и не имеющие никакого отношения к кимберлитам, что не позволяет использовать оранжевый гранат (пироп-альмандин) при шлихо-минералогических поисках месторождений алмаза. Даже при определении химического состава такого граната. Во всяком случае – на севере Русской платформы и в районах развития метаморфических пород.

### **Заключение**

Проведёнными исследованиями самых разных по геологическому происхождению типов пород доказана невозможность использования оранжевого граната (пироп-альмандина эклогитового парагенезиса) при шлихо-минералогических поисках месторождений алмаза, что ранее принималось минералогами-алмазниками интуитивно, «априори». Универсальными минералами-спутниками при шлихо-минералогических поисках месторождений алмаза являются только: пироп, пикроильменит и хромшпинелид. Поэтому напрасно геологическое руководство АК «АЛРОСА» не приняло наш инновационный проект – реальных геологических оснований для такого отказа не было. Но работы не пропали даром, на этот инновационный проект нами был оформлен патент на изобретение [3].

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1) Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж. Породообразующие минералы. Т. 2. Цепочечные силикаты. М.: Изд. Мир. – 1965. – С. 14.
- 2) Никитина Л.П., Иванов М.В. Гранат-клинопироксеновый геотермобарометр для мантийных эклогитов // Доклады РАН. – 1993. – Т. 331(2). – С. 214-216.
- 3) Патент № 2723628 «Способ выделения приоритетных ореолов рассеивания минералов-спутников алмазоносных кимберлитов» / С.М. Саблуков, Ю.Б. Стегницкий. – 2019.
- 4) Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука. – 1974. – 264 с.
- 5) Удовкина Н.Г. Эклогиты СССР. М.: Наука. – 1985. – 286 с.
- 6) Coleman, R.G., Lee, D.E., Beatty, L.B. and Brannock, W.W., 1965. *Eclogites and eclogites: their differences and similarities. Bull. Geol. Soc. Amer.* 76, 3. – Pp. 483-508.
- 7) Nimis, P., Taylor, W.R. *Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer // Contrib. Mineral. Petrol.*, 2000. – V. 139(5). – P. 541-554.
- 8) Schulze, D.J. *A classification scheme for mantle-derived garnets in kimberlite: a tool for investigating the mantle and exploring for diamonds. // In: A Tale of Two Cratons: The Slave-Kaapvaal Workshop. Lithos*, 2003. – V. 71 (2-4). – P. 195-213.

# **ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТЛОЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОТОКОВ ГОРНОГО АЛТАЯ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)**

INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL  
CHARACTERISTICS OF DEPOSITS OF SURFACE WATERCOURSES OF MOUNTAIN ALTAI  
(MOUNTAIN ALTAI)

*Савичев О.Г., Домаренко В.А.*

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*Тел. 8(3822) 606385; E-mail: OSavichev@mail.ru,*

*Тел. 8(3822) 41-89-10; E-mail: Viktor\_Domarenko@mail.ru*

## **Введение**

Горный Алтай характеризуется чрезвычайно разнообразными природными условиями — от горностепных до горно-ледниковых районов, причем все компоненты соответствующих природно-территориальных комплексов достаточно сильно реагируют на изменения климата, что определяет актуальность исследований состояния этих компонентов, условий и механизмов их формирования в рамках общей проблемы изучения, прогнозирования и управления климатическими изменениями природных и социально-экономических систем. Особый интерес вызывают вопросы, связанные с изучением последствий деградации ледников. Обычно подобные работы связаны с оценкой фактических и/или прогнозных значений показателей рельефа, растительного покрова, водного стока и химического состава поверхностных вод. Нами рассмотрен минералого-геохимический аспект указанной выше проблемы, что и определило цель исследования — оценка минерально-геохимического состояния отложений поверхностных водных объектов в условиях климатических изменений на примере горно-ледникового бассейна Актру (элемент речной системы «Актру–Чуя–Катунь–Обь») и участка плоскогорья Укок (болото в долине р. Аргамджи — элемента речной системы «Аргамджи–Калгуты–Ак-Аллаха (Аргут после впадения р. Жасатер)–Катунь–Обь») в Кош-Агачском районе Республики Алтай. Задачи исследования: 1) предварительная оценка минерального и химического состава донных и болотных отложений в разных условиях, которые ранее (в пределах голоцена) предположительно наблюдались в регионе; 2) выявление взаимосвязей между минеральным и химическим составом донных (болотных) отложений и химическим составом поверхностных вод.

## **Исходная информация и методика исследования**

В течение 1997–2023 гг. нами выполнен комплекс исследований поверхностных и подземных водных объектов Горного Алтая, что позволило накопить определенный объем гидрогеохимической информации. В том числе, в 2022 г. в бассейне Актру были отобраны пробы воды и грунта: А1) ручей Водопадный (здесь и далее для водотоков и озера: вода из интервала глубин 0,1–0,3 м от поверхности, донные отложения — в 0,2–1,0 м от уреза воды в слое 0,2 м от поверхности дна, смешанные пробы из точечных проб в вершинах в виде равнобедренного треугольника со стороной 1 м; для определения



химического и минерального состава отбиралась фракция с диаметром частиц  $\leq 1$  мм); А2) река Актру в районе альплагеря Актру (вода и донные отложения), 20,4 км; А3) озеро Голубое, расположенное на границе ледника Левый Актру (вода и донные отложения); А4) река Актру при выходе с ледника Левый Актру, в 22,4 км от устья (вода и донные отложения); А5) ледник Левый Актру, краевой участок, прилегающий к озеру Голубое (проба льда с глубины 0,2-0,5 м и твердый материал на поверхности ледника, также смешанная проба из трех точечных проб); А6) ручей, вытекающий из ледника Малый Актру на участке, ранее (в 1989 г.) находившемся под ледником (вода и донные отложения). В 2023 г. выполнен отбор проб *U7* болотных вод и торфяных отложений в долине р. Аргамджи на плоскогорье Укок: проба воды – также из слоя 0,1-0,3 м от поверхности, проба торфа – в слое 0,1-0,5 м. Схема размещения пунктов отбора проб в 2022 и 2023 гг. приведена на рис. 1, их географические координаты – в табл. 1.

При выполнении отбора проб проводились измерения pH, Eh, удельной электропроводности ЕС, температуры воды и фильтрация воды через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мк для изучения соотношения коллоидной и взвешенно-коллоидной форм миграции химических элементов. В пробе торфяных отложений выделены фракция твердых веществ с диаметром частиц менее 1 мм и 0,002 мм. Лабораторные работы по определению химического состава поверхностных вод в бассейне Актру (валовое содержание

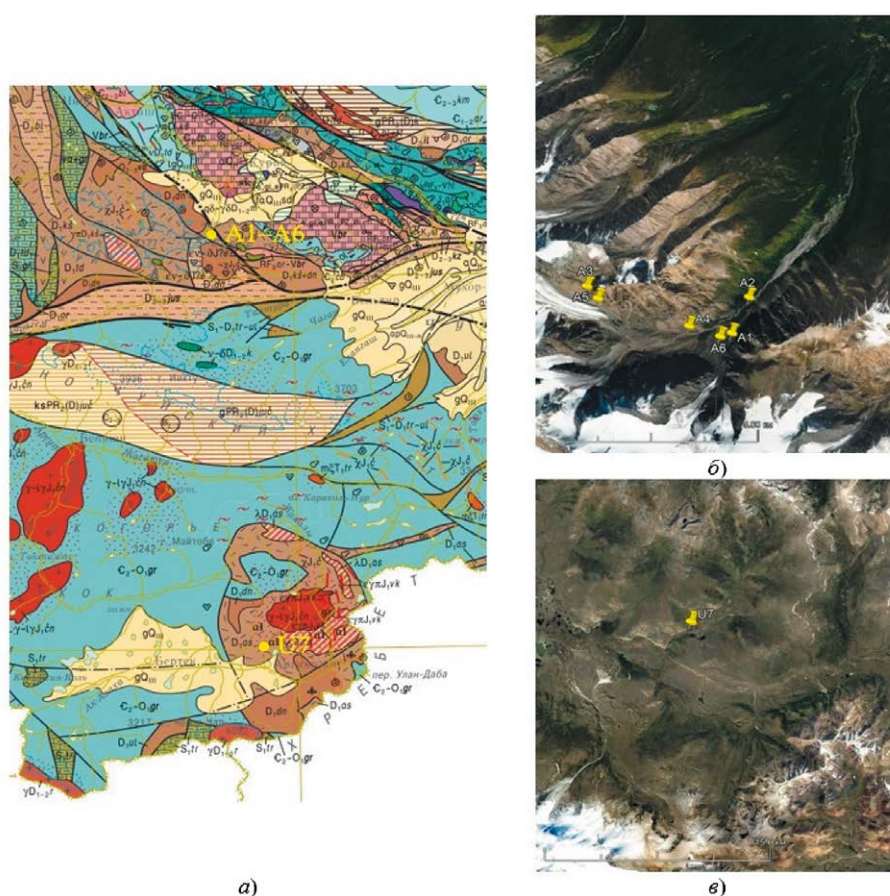


Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора проб воды и грунтов в Горном Алтае в 2022–2023 гг.: а) фрагмент геологической карты масштаба 1:1 000 000, Алтае-Саянская серия, М-45 [7]; на снимке Google Earth: б) участок верхнего течения р. Актру; пункты А1, А2, А3, А4, А5, А6; в) долина р. Аргамджи, пункт *U7* (табл. 1)



и фильтрат) и болотных вод (вал. содержание), водных вытяжек из донных отложений в бассейне Актру и кислотной вытяжки (с азотной кислотой) из торфяных отложений в долине р. Аргамджи выполнены в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории ТПУ.

### Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных результатов показал, что, согласно классификациям О.А. Алекина [1], изученные водные объекты за период наблюдений с 1997 по 2023 гг. характеризуются:

1) по минерализации – от пресных с очень малой минерализацией (талые ледниковые воды) до пресных со средней минерализацией (болотные воды), речные воды – пресные с очень малой и малой минерализацией;

2) по химическому составу:

2.1) талые ледниковые воды – чаще гидрокарбонатные кальциевые первого или третьего типов (более 50%), реже –  $C^{Mg}_I$  (более 30%, в том числе – в пункте А5 19.07.2022 г.) и  $C^{Na}_I$ ;

2.2) речные (и озерные) воды – в основном гидрокарбонатные кальциевые, преимущественно второго типа (65% случаев);

2.3) болотные воды в долине р. Аргамджи (U7, 27.07.2023 г.) – гидрокарбонатные кальциевые первого типа. По величине  $pH$ , согласно [4], талые ледниковые воды – слабокислые, прочие воды – нейтральные или слабощелочные; для болота в долине р. Аргамджи отмечена переходная окислительно-восстановительная обстановка ( $Eh$  62 мВ) и самое высокое значение перманганатной окисляемости ПО (34 мгО/дм<sup>3</sup>), в остальных случаях – окислительная обстановка ( $Eh > 100$  мВ) и ПО в среднем менее 5 мгО/дм<sup>3</sup> (табл. 1).

Таблица 1 Химический состав природных вод в горно-ледниковом бассейне Актру (2022 г.) и болотных вод на плато Укок (2023 г.), состав донных и торфяных отложений

| Показатель    | Ед. изм.           | Пункт отбора проб (см. рис. 1) |                            |                  |                            |                    |                            |                             |
|---------------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|
|               |                    | A1                             | A2                         | A3               | A4                         | A5                 | A6                         | U7                          |
|               |                    | руч. Водопадный                | р. Актру, 20,4 км от устья | ледниковое озеро | р. Актру, 22,4 км от устья | ледник Левый Актру | руч. у ледника Малый Актру | Болото в долине р. Аргамджи |
| Дата отбора   |                    | 18.07.22                       | 18.07.22                   | 19.07.22         | 19.07.22                   | 19.07.22           | 21.07.22                   | 27.07.23                    |
| Высота        | м                  | 2290                           | 2147                       | 2840             | 2334                       | 2722               | 2234                       | 2249                        |
| $\Sigma_{mi}$ | мг/дм <sup>3</sup> | 54,5                           | 95,7                       | 108,5            | 90,7                       | 15,5               | 101,4                      | 432,3                       |
| $Ca^{2+}(в)$  | мг/дм <sup>3</sup> | 11,5                           | 18,2                       | 18,0             | 18,0                       | 1,2                | 16,4                       | 79,0                        |
| $Ca$ (дв)     | мг/кг              | 57,7                           | 43,2                       | 46,6             | 40,6                       | 39,8               | 45,8                       | –                           |
| $K^+(в)$      | мг/дм <sup>3</sup> | 0,2                            | 0,8                        | 1,0              | 1,1                        | 0,9                | 0,6                        | 5,4                         |
| $K$ (дв)      | мг/кг              | 3,3                            | 5,8                        | 7,6              | 6,1                        | 5,1                | 3,7                        | –                           |
| $Si(в)$       | мг/дм <sup>3</sup> | 0,800                          | 10,620                     | 0,480            | 4,210                      | 4,380              | 0,230                      | 8,62                        |
| $Si$ (дв)     | мг/кг              | 1,861                          | 3,807                      | 1,854            | 2,839                      | 5,922              | 5,688                      | –                           |
| $P(в)$        | мг/дм <sup>3</sup> | 0,069                          | 1,309                      | 0,018            | 0,446                      | 4,977              | 0,001                      | 0,247                       |
| $P$ (дв)      | мг/кг              | 0,098                          | 0,407                      | 0,089            | 0,029                      | 1,571              | 0,092                      | –                           |
| $Fe(в)$       | мг/дм <sup>3</sup> | 1,287                          | 24,560                     | 0,383            | 5,955                      | 6,980              | 0,059                      | 2,576                       |

| Показатель                                                    | Ед. изм.            | Пункт отбора проб (см. рис. 1) |                                  |                       |                                  |                          |                                     |                                        |
|---------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|
|                                                               |                     | A1                             | A2                               | A3                    | A4                               | A5                       | A6                                  | U7                                     |
|                                                               |                     | руч. Водо-<br>падный           | р. Актру,<br>20,4 км<br>от устья | леднико-<br>вое озеро | р. Актру,<br>22,4 км<br>от устья | ледник<br>Левый<br>Актру | руч. у<br>ледника<br>Малый<br>Актру | Болото<br>в долине<br>р. Аргам-<br>джи |
| Fe(дв)                                                        | мг/кг               | 0,800                          | 1,231                            | 1,272                 | 0,630                            | 3,459                    | 2,701                               | –                                      |
| La(в)                                                         | мкг/д <sup>3</sup>  | 2,61                           | 18,09                            | 0,08                  | 4,35                             | 4,17                     | 0,02                                | 0,06                                   |
| La(дв)                                                        | мкг/кг              | 0,36                           | 0,49                             | 0,92                  | 0,23                             | 2,96                     | 0,87                                | –                                      |
| U(в)                                                          | мкг/дм <sup>3</sup> | 0,20                           | 1,89                             | 0,13                  | 1,02                             | 0,30                     | 0,20                                | 9,15                                   |
| U(дв)                                                         | мкг/кг              | 0,73                           | 1,24                             | 0,42                  | 1,30                             | 1,41                     | 0,58                                | –                                      |
| Содержание минерала в твердой фракции с диаметром частиц ≤1мм |                     |                                |                                  |                       |                                  |                          |                                     |                                        |
| Альбит                                                        | %                   | 20,9                           | 24,2                             | 22,6                  | 17,2                             | 16,9                     | 12,8                                | 23,3                                   |
| Микроклин                                                     | %                   | 0,0                            | 7,4                              | 7,5                   | 8,4                              | 5,5                      | 2,6                                 | 10,8                                   |
| Ортоклаз                                                      | %                   | 3,2                            | 3,2                              | 5,1                   | 7,2                              | 4,1                      | 2,1                                 | 0,0                                    |
| Амфибол                                                       | %                   | 0,0                            | 0,0                              | 1,4                   | 0,0                              | 2,0                      | 0,0                                 | 0,0                                    |
| Мусковит                                                      | %                   | 0,0                            | 0,0                              | 0,0                   | 0,0                              | 0,0                      | 0,0                                 | 15,9                                   |
| Клинохлор                                                     | %                   | 7,3                            | 9,4                              | 28,2                  | 12,7                             | 20,6                     | 10,6                                | 2,2                                    |
| Иллит                                                         | %                   | 35,5                           | 22,5                             | 17,1                  | 21,9                             | 34,2                     | 42,0                                | 0,0                                    |
| Каолинит                                                      | %                   | 0,0                            | 0,7                              | 1,0                   | 0,0                              | 0,0                      | 0,0                                 | 0,0                                    |
| Цеолит                                                        | %                   | 0,9                            | 0,6                              | 0,9                   | 2,0                              | 1,4                      | 0,0                                 | 0,0                                    |
| Кальцит                                                       | %                   | 1,6                            | 1,8                              | 4,9                   | 3,1                              | 0,0                      | 3,8                                 | 0,0                                    |
| Кварц                                                         | %                   | 30,6                           | 30,2                             | 11,3                  | 27,5                             | 15,3                     | 26,1                                | 47,8                                   |

Примечание:  $pH$  – водородный показатель;  $\Sigma_{mi}$  – сумма главных ионов ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ); ПО – перманганатная окисляемость; «в» – валовое содержание в воде; «дв» – содержание в водной вытяжке из донных отложений

Главные ионы находятся в поверхностных водах (>50% от валового содержания) преимущественно в растворенной форме (возможно, частично в виде коллоидов). Высокая доля содержания в фильтрате (после мембранного фильтра 0,45 мк) выявлена и для  $Au$ , в меньшей степени (менее 50%, но более 30% от валового содержания) – для  $U$  и  $Sb$ . Прочие микроэлементы, а также  $Si$ ,  $P$ ,  $Fe$  мигрируют в поверхностных водах (<30% от валового содержания) в основном во взвешенном и коллоидном состоянии (табл. 2). В целом для поверхностных вод наблюдается общее увеличение содержаний растворенных солей от ледников до горно-таежных и горно-степных участков (примерно в 11–17 км от нижней границы зоны абляции ледника Левый Актру), связанное с: 1) выщелачиванием горных пород при таянии ледового материала на границе ледников; 2) выносом глинистых частиц на участке от нижнего конца открытой поймы до выхода из горно-лесного в горно-степной участок и последующей аккумуляцией речных наносов и сорбцией на глинистых частицах ряда микроэлементов.

При этом, вследствие русловых процессов и внутригодовых изменений водного стока, может происходить переотложение наносов и, соответственно, изменение взаимодействий их с водами. С учетом этого закономерности пространственно-временного распре-

деления геохимических показателей водных и кислотных вытяжек не столь очевидны, как в случае речных вод.

Таблица 2 Характеристика форм миграции в водной среде и аккумуляции в донных (болотных) отложениях в Горном Алтае

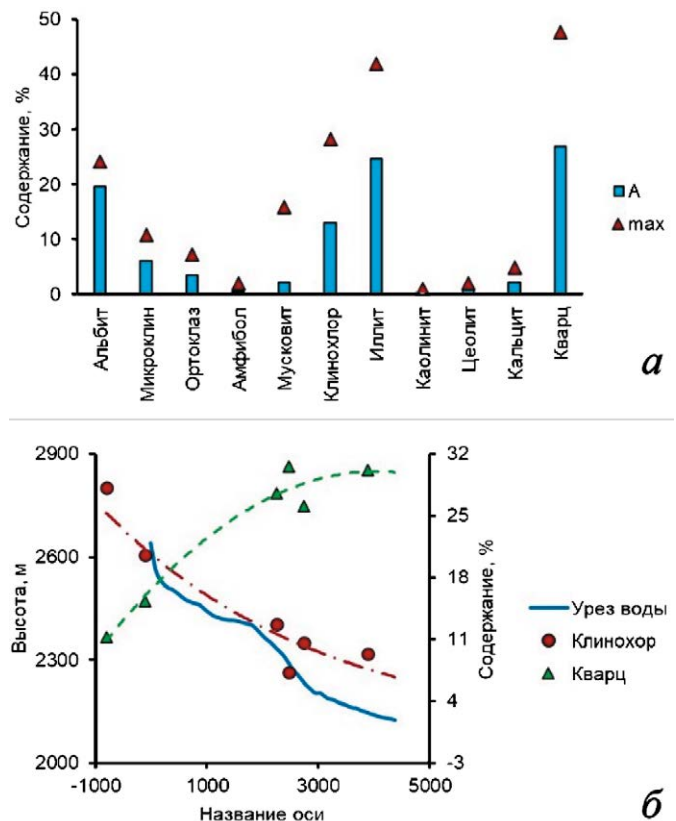
| Элемент | Отношение концентрации в фильтрате к валовому содержанию в водах горно-ледникового бассейна Актуру в 2022 г. |            |      |      | Концентрации в вытяжках из донных (болотных) отложений в долине р. Аргамджи в 2023 г. с использованием азотной (N) и плавиковой кислот (F), включая вытяжку из глинистой фракции (F*) |        |       |                                                              |          |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|--------------------------------------------------------------|----------|
|         | A                                                                                                            | $\delta_A$ | Min  | max  | (N)                                                                                                                                                                                   | (F)    | (F*)  | (N)/(F)                                                      | (F*)/(F) |
|         | % от валового содержания в водной среде                                                                      |            |      |      | мг/кг                                                                                                                                                                                 |        |       | % от валового содержания с использованием плавиковой кислоты |          |
| Ca      | 60,5                                                                                                         | 17,1       | 16,3 | 99,9 | 7199                                                                                                                                                                                  | 36939  | 17002 | 19,5                                                         | 46,0     |
| Mg      | 53,2                                                                                                         | 16,6       | 3,4  | 99,9 | –                                                                                                                                                                                     | –      | –     | –                                                            | –        |
| Na      | 77,6                                                                                                         | 9,2        | 46,4 | 98,8 | 129                                                                                                                                                                                   | 14076  | 9370  | 0,9                                                          | 66,6     |
| K       | 59,9                                                                                                         | 13,1       | 15,0 | 95,3 | –                                                                                                                                                                                     | –      | –     | –                                                            | –        |
| Si      | 28,9                                                                                                         | 13,5       | 1,9  | 87,0 | –                                                                                                                                                                                     | –      | –     | –                                                            | –        |
| P       | 14,0                                                                                                         | 3,8        | 1,1  | 20,0 | –                                                                                                                                                                                     | –      | –     | –                                                            | –        |
| Fe      | 12,6                                                                                                         | 10,4       | 0,2  | 64,0 | 2692                                                                                                                                                                                  | 23072  | 11189 | 11,7                                                         | 48,5     |
| Li      | 13,5                                                                                                         | 7,2        | 2,2  | 47,2 | –                                                                                                                                                                                     | –      | –     | –                                                            | –        |
| Al      | 14,3                                                                                                         | 12,7       | 0,4  | 77,7 | –                                                                                                                                                                                     | –      | –     | –                                                            | –        |
| Ti      | 10,6                                                                                                         | 9,0        | 0,4  | 55,6 | –                                                                                                                                                                                     | –      | –     | –                                                            | –        |
| Cr      | 13,0                                                                                                         | 5,1        | 1,2  | 29,7 | 4,37                                                                                                                                                                                  | 34,19  | 22,65 | 12,8                                                         | 66,3     |
| Co      | 3,6                                                                                                          | 1,3        | 0,2  | 7,6  | 1,53                                                                                                                                                                                  | 8,14   | 3,95  | 18,7                                                         | 48,6     |
| Cu      | 16,2                                                                                                         | 8,3        | 0,4  | 53,2 | –                                                                                                                                                                                     | –      | –     | –                                                            | –        |
| Zn      | 11,1                                                                                                         | 5,8        | 0,8  | 36,4 | 14,42                                                                                                                                                                                 | 53,92  | 35,20 | 26,7                                                         | 65,3     |
| Rb      | 14,6                                                                                                         | 3,1        | 3,1  | 22,9 | 1,86                                                                                                                                                                                  | 125,26 | 78,03 | 1,5                                                          | 62,3     |
| Sr      | 18,2                                                                                                         | 7,2        | <0,1 | 47,0 | 35,72                                                                                                                                                                                 | 40,00  | 25,87 | 89,3                                                         | 64,7     |
| Ba      | 7,3                                                                                                          | 3,8        | 0,4  | 25,1 | 21,97                                                                                                                                                                                 | 343,96 | 225,2 | 6,4                                                          | 65,5     |
| La      | 12,7                                                                                                         | 10,9       | 0,1  | 67,0 | 2,56                                                                                                                                                                                  | 28,55  | 22,62 | 9,0                                                          | 79,2     |
| Ce      | 11,1                                                                                                         | 9,7        | 0,1  | 59,3 | 6,11                                                                                                                                                                                  | 70,02  | 43,39 | 8,7                                                          | 62,0     |
| Nd      | 11,5                                                                                                         | 11,1       | 0,1  | 66,9 | 3,51                                                                                                                                                                                  | 21,01  | 17,33 | 16,7                                                         | 82,5     |
| Sm      | 4,2                                                                                                          | 3,2        | 0,1  | 20,0 | 0,91                                                                                                                                                                                  | 9,53   | 5,36  | 9,6                                                          | 56,3     |
| Au      | 62,1                                                                                                         | 12,8       | 10,7 | 97,7 | <0,001                                                                                                                                                                                | 0,389  | 0,002 | 0,01                                                         | 0,59     |
| U       | 35,4                                                                                                         | 9,7        | 2,2  | 65,3 | 8,45                                                                                                                                                                                  | 20,01  | 12,68 | 42,2                                                         | 63,4     |

Полученные данные в целом подтверждают указанные выше предположения:

1) абсолютное и относительное содержание целого ряда химических элементов в растворенной (молекулярно-дисперсной) форме снижается по мере движения водных масс от ледников к участкам горной степи;

2) минеральный состав фракции с диаметром частиц  $\leq 1$  мм, наиболее подвижных в горных потоках [16], представлен в основном плагиоклазами, кварцем, хлоритами и глинистыми минералами (каждая группа – более 10% от содержания, рис. 2а); вместе с тем, от ледников до горной степи уменьшается содержание хлоритов и увеличивается доля кварца во фракции донных отложений с диаметром частиц до 1 мм; амфиболы обнаружены только в отложениях на леднике Левый Актру и в озере Голубое, а мусковит – только в минеральных включениях в торфах болота в долине р. Аргамджи (табл. 1, рис. 2б).

Рис. 2. Характерные содержания минералов во фракции донных отложений в бассейнах Актру и Аргамджи с диаметром частиц  $\leq 1$  мм (а: А и *max* – среднее арифметическое и максимум) и изменение содержаний клинохлора и кварца в отложениях бассейна Актру (б)



Из этого следует, что, как и в случае других рек бассейна р. Обь (Томь, малые реки Киргизка, Омутная, Правая Сарала), а также р. Красной/Хонг в юго-восточной Азии (рр. Бан Тхи, Ченгу, Дай, Намду, Фодай), основные закономерности изменения минерального состава донных отложений связаны с возрастанием доли кварца от истоков к устьям рек протяженностью более 11-20 км при одновременном снижении вклада минералов с показателем гипергенной устойчивости (логарифм произведения плотности и твердости) менее 1,26-1,27 [15]. Кроме того, при формировании химического состава вод имеет значение соотношение форм миграции, способность к сорбции и образованию устойчивых органо-минеральных комплексов (с учетом гидрологических условий). Так, доля предположительно растворенной формы миграции  $U$ , как указано выше, возрастает от ледников к горной степи, а максимальная концентрация (валовая) отмечена в болотных водах (см. табл. 1), причем более 40% содержания этого элемента в минеральных включениях в торф приходится предположительно на органические соединения, а более 60% – на глинистую фракцию (в предположении, что анализ вытяжки с использованием азотной кислоты позволяет достоверно оценить содержание в органо-минеральных отложениях, а с плавиковой кислотой – полное содержание в минеральных частицах;

см. табл. 2). Другой пример – взаимосвязанное уменьшение в направлении от ледников к горностепным участкам содержания клинохлора в донных отложениях и концентраций калия в вытяжках из них (табл. 3). Причем коэффициенты корреляции с валовой концентрацией  $K^+$  и долей его растворенной формы менее 0,7 связаны не с отсутствием связей, а с их существенно нелинейным характером, обусловленным резким увеличением концентраций в болотных водах (рис. 3) и весьма неравномерным распределением в минеральных микровключениях (табл. 4, коэффициент вариации  $Cv=\sigma/A=1,97$ , где  $\sigma$  и  $A$  – среднее квадратическое отклонение и среднее арифметическое).

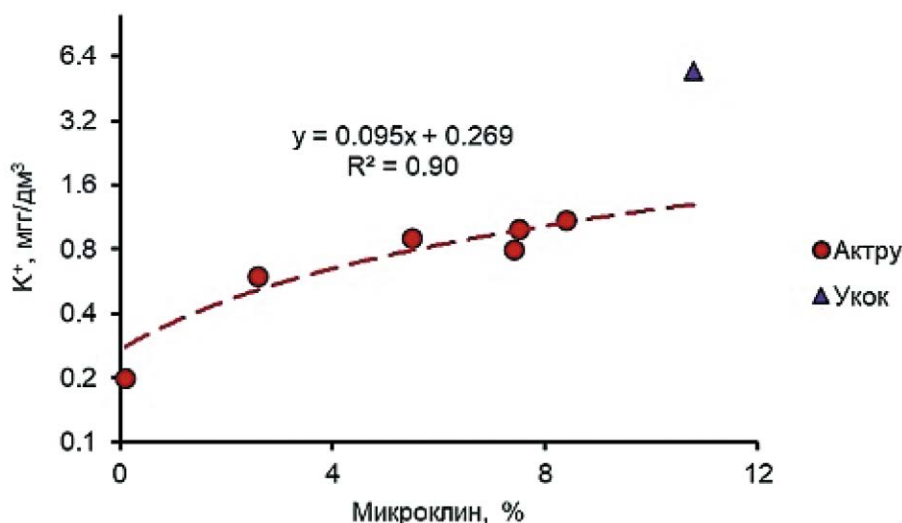


Рис. 3. Зависимость между содержанием микроклина в донных отложениях с диаметром частиц до 1 мм и валовыми концентрациями  $K^+$  в поверхностных водах Горного Алтая

Таблица 3 Статистически значимые коэффициенты корреляции между показателями химического и минерального состава донных и торфяных отложений

| Показатель   | Альбит | Микроклин | Ортоклаз | Амфибол | Клинохлор | Иллит   | Каолинит | Цеолит  | Кальцит | Кварц   |
|--------------|--------|-----------|----------|---------|-----------|---------|----------|---------|---------|---------|
| Высота       | –      | –         | –        | 0,92    | 0,91      | –       | –        | –       | –       | -0,79   |
| $\sum m_i$   | –      | –         | –        | –       | –         | –       | –        | –       | (0,88)  | –       |
| $Ca^{2+}(в)$ | –      | –         | –        | –       | –         | –       | –        | –       | (0,79)  | –       |
| $Ca(дв)$     | –      | (-0,79)   | –        | –       | –         | –       | –        | –       | –       | –       |
| $Mg^{2+}(в)$ | –      | –         | –        | –       | –         | –       | –        | –       | (0,91)  | –       |
| $Mg(дв)$     | –      | –         | –        | (-0,82) | (-0,71)   | –       | –        | –       | –       | –       |
| $Na^+(в)$    | –      | –         | –        | (0,71)  | –         | –       | –        | –       | (-0,71) | –       |
| $Na(ф)$      | –      | (-0,79)   | –        | –       | –         | –       | –        | –       | –       | –       |
| $K^+(в)$     | –      | (0,95)    | (0,71)   | –       | –         | –       | –        | –       | –       | –       |
| $K(ф)$       | –      | –         | –        | (0,72)  | –         | –       | –        | –       | –       | (-0,81) |
| $K(дв)$      | –      | (0,88)    | –        | –       | (0,74)    | (-0,92) | (0,76)   | –       | –       | –       |
| $Si(ф)$      | –      | –         | –        | –       | –         | –       | –        | (-0,73) | –       | –       |

| Показатель     | Альбит  | Микро-<br>клин | Орто-<br>клаз | Амфи-<br>бол | Клино-<br>хлор | Иллит | Каолинит | Цеолит  | Кальцит | Кварц   |
|----------------|---------|----------------|---------------|--------------|----------------|-------|----------|---------|---------|---------|
| <i>P</i> (в)   | –       | –              | –             | –            | –              | –     | –        | –       | (-0,78) | –       |
| <i>P</i> (дв)  | –       | –              | –             | (0,73)       | –              | –     | –        | –       | (-0,77) | –       |
| <i>Fe</i> (ф)  | –       | –              | –             | –            | –              | –     | –        | (-0,71) | –       | –       |
| <i>Al</i> (ф)  | (-0,72) | –              | –             | –            | –              | –     | –        | –       | –       | –       |
| <i>Al</i> (дв) | –       | –              | –             | –            | (0,76)         | –     | –        | –       | –       | (-0,78) |
| <i>Co</i> (ф)  | –       | –              | –             | (0,9)        | (0,86)         | –     | –        | –       | –       | (-0,95) |
| <i>Co</i> (дв) | –       | –              | –             | (0,82)       | –              | –     | –        | –       | –       | –       |
| <i>La</i> (ф)  | (-0,71) | –              | –             | –            | –              | –     | –        | (-0,7)  | –       | –       |
| <i>La</i> (дв) | –       | –              | –             | (0,86)       | –              | –     | –        | –       | –       | –       |
| <i>U</i> (ф)   | –       | –              | –             | (-0,83)      | –              | –     | –        | –       | –       | –       |
| <i>U</i> (дв)  | –       | –              | –             | –            | –              | –     | –        | –       | (-0,73) | –       |

Примечание: в скобках приведены значимые коэффициенты корреляции, полученных по 6 пробам в горно-ледниковом бассейне Актру; в прочих случаях приведены значимые коэффициенты для валовых содержаний в воде, полученные и для бассейна Актру (6 проб) и для выборки с добавлением болотных вод в долине р. Аргамджи на плато Укок (7 проб).

Таблица 4 Химический состав минеральных включений в торфяных отложениях в долине р. Аргамджи (плато Укок) в 2023 г., % от веса (20 проб)

| Элемент   | Среднее арифметическое, <i>A</i> | Погрешность определения среднего, $\delta_A$ | Максимум |
|-----------|----------------------------------|----------------------------------------------|----------|
| <i>Al</i> | 5,5                              | 1,0                                          | 16,7     |
| <i>Ca</i> | 4,3                              | 1,8                                          | 30,8     |
| <i>Сe</i> | 4,2                              | 1,8                                          | 22,8     |
| <i>Fe</i> | 2,9                              | 0,9                                          | 11,8     |
| <i>La</i> | 1,8                              | 0,7                                          | 9,1      |
| <i>P</i>  | 2,2                              | 1,0                                          | 14,3     |
| <i>K</i>  | 1,2                              | 0,5                                          | 7,4      |
| <i>Si</i> | 15,1                             | 2,3                                          | 38,3     |
| <i>Na</i> | 0,4                              | 0,3                                          | 6,9      |
| <i>S</i>  | 0,1                              | 0,1                                          | 2,2      |

### Заключение

Полученные данные о пространственном распределении химических элементов в поверхностных водах и вытяжках из фракции донных отложений с диаметром частиц менее 1 мм, а также их минеральном составе имеют предварительный характер. Тем не менее, их анализ позволяет, во-первых, уточнить методику геохимических поисков полезных ископаемых (акцент на поиск и изучение болотных отложений на границе горно-таежных и горностепных участков как в настоящее время, так и в ретроспективе) и пред-



положить возможность снижения негативных последствий разработки месторождений твердых полезных ископаемых в горных районах путем создания искусственных или «доработки» естественных заболоченных участков или болот. Во-вторых, общие закономерности формирования химического состава поверхностных вод и донных отложений в горно-ледниковых бассейнах (как минимум — Алтай) определяются интенсивным растворением первичных алюмосиликатов в зоне взаимодействия талых ледниковых вод с горными породами, в том числе (и особенно) мелкой фракцией продуктов их механического разрушения. При этом значительная часть ряда химических элементов находится в водном растворе в молекулярно-дисперсном и коллоидном состояниях. Затем, по мере перемещения водных масс от зоны абляции ледников к горно-таежным участкам (11-20 км от истоков рек) происходит насыщение и даже пересыщение вод относительно ряда минералов и органоминеральных соединений, осаждение части наносов, их перераспределение по потоку и сорбция некоторых микроэлементов на частицах наносов. На выходе потоков на горностепные участки, особенно с малыми уклонами водной поверхности и благоприятными условиями для заболачивания долин, наблюдается дополнительная аккумуляция веществ всех форм миграции. В-третьих, при дальнейшем потеплении климата и деградации ледников следует ожидать дополнительную аккумуляцию ряда химических элементов (в том числе редкоземельных и урана) именно на границе горно-таежных и горностепных участков. Возможно, что при достаточно длительной устойчивой деградации ледников при общей аридизации климата могут формироваться значительные геохимические аномалии.

*Работа выполнена за счет средств гранта РНФ № 23-27-00039.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Алекин О.А. Основы гидрохимии. — Л.: Гидрометеиздат, 1970. — 444 с.
- 2) Галахов В.П. Ледники Актру (Алтай). Водно-ледовый и тепловой баланс горно-ледниковых бассейнов / В.П. Галахов, Ю.К. Нарожнев, С.А. Никитин, П.А. Окишев, В.В. Севастьянов, Л.М. Севастьянова, Л.Н. Шантыкова, В.И. Шуров — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 120 с.
- 3) Гидрогеология СССР. Т. 17. Кемеровская область и Алтайский край. — М.: Недра, 1972. — 398 с.
- 4) Гидрохимические показатели состояния окружающей среды / Под ред. Т.В. Гусевой. М.: ФОРУМ, ИНФРА-М. — 2007. — 192 с.
- 5) ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. *Soils. Classification*. — М.: Стандартинформ, 2020. — 49 с.
- 6) ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. *Water. General requirements for sampling*. — М.: Стандартинформ, 2020. — 35 с.
- 7) Государственная геологическая карта масштаба 1:1 000 000. Алтае-Саянская серия, лист М-45. — М.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2011.
- 8) Гусев А.И. Магмо-рудно-метасоматическая система Актру в Горном Алтае / А.И. Гусев, А.Ф. Коробейников, А.Я. Пшеничкин, В.А. Домаренко // Успехи современного естествознания. — 2014. — № 7. — С. 75-79.
- 9) Недра России. В 2 т. Т. 1. Полезные ископаемые / Под ред. Н.В. Межеловского и А.А. Смыслова. — СПб: ВСЕГЕИ, 2001. — 547 с.
- 10) Окишев П.А. Рельеф и оледенение Русского Алтая. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2011. — 382 с.

- 11) Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / Под ред. В.М. Котлякова. М.: Наука, 2006. — 482 с.
- 12) Паромов В.В. Оценка современной динамики и прогноз гляциологических характеристик ледника Малый Актру (Центральный Алтай) / В.В. Паромов, Ю.К. Нарожный, Л.Н. Шантыкова // Лёд и снег. 2018. — Т. 58. — № 2. — С. 171-182. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-171-182.
- 13) Поцелуев А.А. Калгутинское редкометалльное месторождение (Горный Алтай): магматизм и рудогенез / А.А. Поцелуев, Л.П. Рихванов, А.Г. Владимиров, И.Ю. Анникова, Д.И. Бабкин, А.Ю. Никифоров, В.И. Котегов. — Томск: STT, 2008. — 226 с.
- 14) Савичев О.Г. Биологическая очистка сточных вод с использованием болотных биогеоценозов // Изв. Томск. политех. ун-та. — 2008. — Т. 312. — № 1. — С. 69-74.
- 15) Савичев О.Г. Трансформация минерального состава донных отложений от истоков к устьям рек / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, Е.В. Перегудина, О.Е. Лепокурова // Изв. Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 7. С. 43-56.
- 16) Савичев О.Г. Условия выноса и аккумуляции химических элементов в горно-ледниковом бассейне Актру (Горный Алтай) / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, С.И. Арбузов, А.Я. Пшеничкин, Е.А. Вильгельм // Разведка и охрана недр. — 2019. — № 3. — С. 55-62.
- 17) Тимошок Е.Е. Динамика ледников и формирование растительности на молодых моренах Центрального Алтая / Е.Е. Тимошок, Ю.К. Нарожный, М.Н. Диркс, С.Н. Скороходов, А.А. Березов. — Томск: Изд-во НТЛ, 2008. — 208 с.
- 18) Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200 000 / Отв. ред. Э.К. Буренков. М.: ИМГРЭ, 2002. — 92 с.
- 19) *Manual on Stream Gauging. V. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. — 252 p.*
- 20) Savichev, O.G., Paromov, V.V. Chemical composition of glacial meltwaters and river waters within the Aktru river basin (Gornyi Altai) // *Geography and Natural Resources*. 2013. — Vol. 34. — № 4. — С. 364-370. doi: 10.1134/S1875372813040100.

УДК 551.14:552.18:553.81:552.323.6

## МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ НАЛИЧИЯ КРУПНЫХ АЛМАЗОВ В КИМБЕРЛИТАХ

Симаков С.К., Стегницкий Ю.Б.

Вилуйская ГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО), Санкт-Петербург

e-mail: simakov1957@yandex.ru, StegnitskiyYuB@alrosa.ru

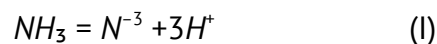
**Ключевые слова:** алмазы, кимберлиты, флюиды, мантия, CLIPPIR

В работе представлен минералого-петрологический метод оценки возможности присутствия в кимберлитах крупных алмазов типа *Ila* на основе флюидно-магматической модели образования алмаза. В настоящее время методы поиска крупных алмазов представляют большой интерес, поскольку их стоимость и востребованность остаются постоянными, несмотря на снижение мирового алмазного рынка. Особенно это касается сверхкрупных алмазов типа *Ila* весом более 100 каратов или, как еще их называют, «CLIPPIR diamonds» (Подобный Куллинану, Крупный, Бедный на включения, Чистый, Неправильной формы и Растворенный) (Smith et al., 2016), цены на которые исчисляются миллионами долларов. К ним относятся крупнейшие драгоценные камни, такие, как «Куллинан» (3106 каратов), добытый из кимберлита тр. Куллинан (Премьер), и знаменитые россыпные камни из Индии, в том числе «Кох-и-Нур». Из имеющихся на сегодняшний день данных по известным гигантским алмазам более 400 каратов, добытых за всю историю человечества, следует, что 70% из них соответствует алмазам типа *Ila* (Ferraris, 2023). При этом 57% всех крупных кристаллов были добыты в африканских трубках, где доля алмазов типа *Ila* составляет 75%. Основными их источниками (43%) являются трубки Карове, Куллинан (Премьер), и Летсенг (89% в выборке составляют алмазы типа *Ila*), 3% (тип *Ila*) – тр. Джваненг, 3% (тип *I* и *Ila*) – Ягерсфонтейн и 8% (тип *I*) – тр. поля Кимберли. Известна находка кристалла типа *I* такого размера в Канаде (тр. Джерико). Алмазы типа *Ila* более 100 каратов встречаются также в южноафриканских тр. Орапа, Као, Мотасе, Монастери и Лихобонг (Gurney and Helmstaedt 2012; Moore 2009, 2014). Несколько таких кристаллов найдено в якутских и архангельских трубках Зарница и Гриба (<https://jewellerymag.ru/p/alrosa-207ct-diamond>, Устинов и др., 2021). Основными особенностями изученных африканских кристаллов являются их высокая степень резорбции; низкий  $\delta^{13}\text{C}$ ; неправильная форма, иногда с плохо сохранившимися додекаэдрическими гранями; низкое содержание азота ( $N < 10 \text{ ppm}$ ); отсутствие мантийных силикатных и оксидных включений; наличие сульфидов и графита; отсутствие ассоциации с мелкими алмазами (Bowen et al., 2009; Gaillou et al., 2012; Gurney and Helmstaedt, 2012; Levinson et al., 1992; Moore, 2009). Модальное значение  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) соответствует диапазону от -17 до -21‰ между средними значениями мантийных алмазов и абиотического метана, образующегося при серпентинизации офиолитовых массивов (от -0,3 до -31‰) (Banas et al., 2017; Milledge et al., 1983). Вышеприведенные особенности позволяют выделить их в особый неизученный тип парагенезиса (Moore, 2009).

В настоящее время генезис этих алмазов изучен слабо; существуют расплавные и флюидные модели их образования (Moore, 2009; Shirey et al., 2020; Simakov, 2018;

*Smith et al.*, 2016). По нашему мнению, конечное образование таких алмазов происходит на заключительных этапах формирования кимберлитов из флюидов в зоне вебстеритового солидуса на границе графит-алмаз (*Simakov*, 2018; *Simakov et al.*, 2023). Подтверждением этому является аномально высокое содержание включений флогопита в крупных алмазах Якутии (Бардухинов и др., 2024), что свидетельствует об участии флюида в процессе их формирования. Данная модель позволяет объяснить все минералого-геохимические особенности крупных алмазов типа *Ila*, отмеченные для них Муром (2009). Предложенный метод позволяет по составам пироповых ксенокристов рассчитать флюидный состав кимберлитовых трубок (*Simakov and Stegnitskiy*, 2021), и оценить по флюидно-магматической модели вероятность образования крупных алмазов.

По данным различных исследователей в южноафриканских, якутских и зимнеберезных алмазах количество азота и водорода уменьшается с увеличением их крупности (Бардухинов и др., 2024; Васильев и др., 2023; *Moore*, 2009; *Smith et al.*, 2017). В 70% гигантских алмазов (>400 crt) азот отсутствует (*Ferraris*, 2023). Это соответствует общей природной тенденции увеличения размерности природных алмазов с уменьшением содержания в них азота (*Simakov et al.*, 2023). Атомы азота и водорода могут входить в структуру алмаза при разложении аммиака или меламина по реакциям типа:



При этом доля аммиака во флюиде максимальна при его углеводородном составе и убывает с ростом воды и  $\text{CO}_2$  (*Симаков*, 1983; *Simakov*, 2006; *Sokol et al.*, 2017). Таким образом, алмазы с наибольшим содержанием азота образуются в условиях восстановленного флюида, а алмазы с его малым содержанием — в условиях окисленного флюида. На диаграмме *C-O-H* доля аммиака во флюиде должна быть максимальна в области метановых составов и убывать с ростом воды и  $\text{CO}_2$  (*Simakov*, 2006; *Sokol et al.*, 2017). Подтверждением этому являются расчеты фугитивности кислорода и составов *C-O-H* флюида, проведенные для эклогитовых включений из алмазов тр. Куллинан с известными содержаниями азота. Алмазы с наиболее восстановленными условиями образования имеют максимальные содержания азота и на диаграмме *C-O-H* соответствуют метановым составам флюида (рис. 1).

Для южноафриканских кимберлитовых трубок были проведены оценки *P-T-FO<sub>2</sub>* параметров и расчеты равновесного флюида *C-O-H* по составам пироповых ксенокристов методом, описанным в (*Simakov and Stegnitskiy*, 2021) (рис. 2). Расчетные флюиды тр. Куллинан (Премьер), Летсенг, Ягерсфонтейн, а также Као, Мотае, Орапа, Као, Монастери и Лихобонг, содержащих максимальное количество безазотных алмазов-гигантов, соответствуют водно-двууглекислым и двууглекислым составам и являются менее алмазоносными по отношению к полю Кимберли. В то же время алмазоносные трубки поля Кимберли (Бошоф, Дьютойтспен, Пульсатор и Камферсдам), где алмазы-гиганты типа *Ila* отсутствуют, а известна только одна находка кристалла такой размерности типа *I*, имеют более восстановленный водно-метановый флюид. Данные расчеты ставят под сомнение модель Смита и др. (2016) об образовании алмазов из расплавов железа в восстановительных условиях астеносферы. По их модели алмазы тр. Куллинан с меньшим содержанием азота должны были бы располагаться в поле метановых составов флюида, соответствующих области существования расплавов железа (рис. 1), также, как и кимберлитовые трубки, содержащие гигантские алмазы типа *Ila* (рис. 2).

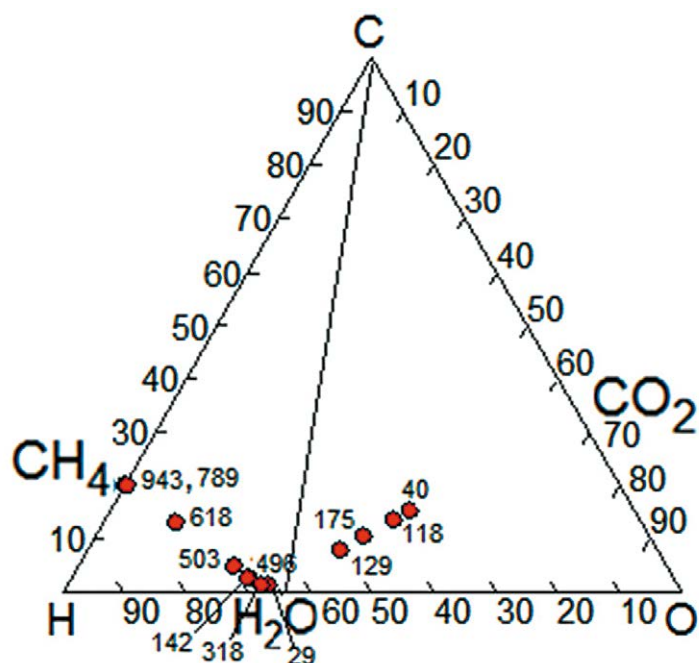


Рис. 1. C-H-O составы рассчитанных флюидов для алмазов тр. Куллинан с эклогитовым парагенезисом и известным содержанием азота (в ppm) P-T- $FO_2$  параметры включений рассчитывались по гранат-клинопироксеновым термобарометрам Накамуры (2009) и Симакова (2008) и гранат-клинопироксен-кварцевому оксибарометру Симакова (2006). Флюидные составы – по модели Янга и Дуана (2010). Анализы для расчетов взяты из работ Гарни и др. (1985), содержание азота в алмазах – из работы Дейнса и др. (1989)

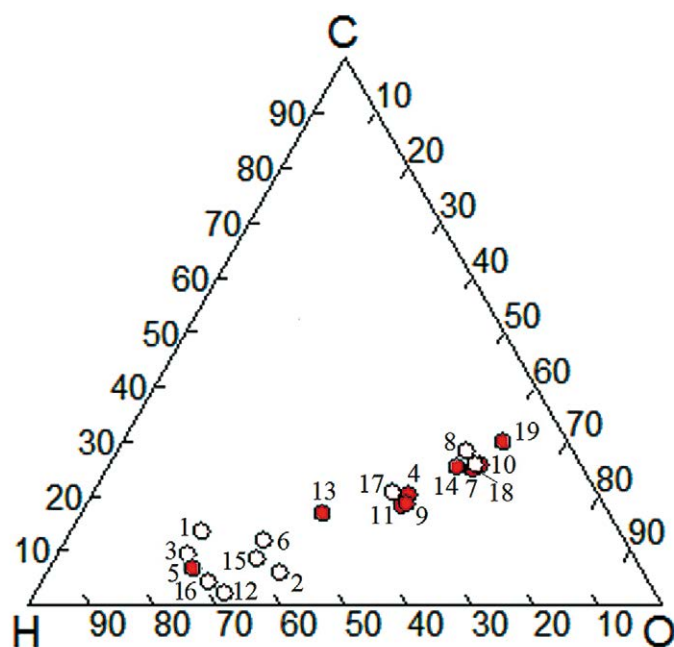


Рис. 2. Средние C-H-O составы рассчитанных флюидов для южноафриканских трубок

1 – Бошоф, 2 – Дьютойтспен, 3 – Финш, 4 – Ягерсфонтейн, 5 – Джваненг, 6 – Камферсдам, 7 – Као, 8 – Крунштадт, 9 – Летсенг, 10 – Лихобонг, 11 – Монастери, 12 – Ньюлэнд, 13 – Орапа, 14 – Куллинан, 15 – Пульсатор, 16 – Робертс Виктор, 17 – Тсабунг, 18 – Таба Путсоа, 19 – Мотае. Данные по составу пиропов для расчета взяты из (Chasse *et al.*, 2018; Simakov and Stegnitskiy, 2021). Условные обозначения: • – трубки, содержащие алмазы типа IIa размером более 100 каратов

Данным методом были оценены средние составы флюидов и для ряда кимберлитовых трубок Якутии с известным средним содержанием азота в алмазах. Наиболее восстановленные флюиды, сопоставимые с трубкой Кимберли, имеют высокоалмазоносные тр. Интернациональная, Мир и Ботуобинская с высокими средними содержаниями азота в алмазах, где крупные алмазы отсутствуют. Тр. Деймос, Новинка, Зарница и Заполярная, где встречается максимальное количество крупных алмазов более 50 каратов (Бардухинов и др., 2024), соответствуют более окисленным водно-двууглекислому и двууглекислому флюидам и более низкой алмазоносности. Тр. Зарница имеет более низкие содержания азота (рис. 3), что согласуется с аналогичными расчетами для южноафриканских трубок, содержащих гигантские алмазы типа *Ila* (см. рис. 2). При этом содержание азота в алмазах во всех трубках в целом уменьшается с увеличением степени окисленности.

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод, что содержание азота в алмазах в целом увеличивается с увеличением восстановленности флюида. Алмазы-гиганты типа *Ila* приурочены в основном к низкоалмазоносным трубкам с окисленным составом флюида, а не к высокоалмазоносным, имеющим более восстановительные флюиды. Таким образом, предлагаемый минералого-петрологический метод оценки позволяет ранжировать кимберлитовые породы по степени вероятности нахождения в них крупных алмазов по расчетам  $P$ - $T$ - $FO_2$  параметров и равновесного флюида, исходя из составов пироповых ксенокристов кимберлитов. Двууглекисло-водный состав  $C$ - $O$ - $H$  флюидов служит положительным критерием для находок в кимберлитовых трубках крупных алмазов и алмазов-гигантов.

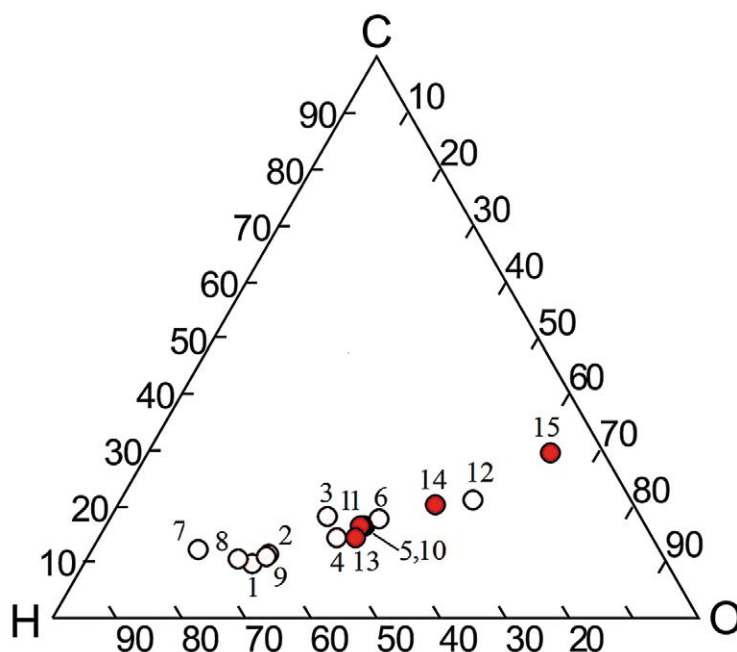


Рис. 3. Средний состав флюидов для якутских трубок с известным средним содержанием азота в алмазах (по данным Хачатрян и др., 2022)

В скобках — среднее содержание азота, в *ppm*; трубки: 1 — Ботуобинская (460), 2 — Удачная (170), 3 — Юбилейная (400), 4 — Айхал (330), 5 — Сытыканская (240), 6 — Нюрбинская (530), 7 — Интернациональная (500), 8 — Мир (450), 9 — Дачная (430), 10 — Комсомольская (200), 11 — Зарница (237), 12 — Таежная (320), 13 — Деймос, 14 — Новинка, 15 — Заполярная. Данные по составу пиропов для расчета взяты из (Simakov and Stegnitskiy, 2021). Условные обозначения: • — трубки, содержащие крупные алмазы типа *Ila*.



# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Бардухинов Л.Д., Седых Е.М., Евстратов А.А. Первые результаты изучения крупных алмазов из промышленных месторождений Якутии // Геология рудных месторождений. — 2024. — Т. 66. — № 4. — С. 362-383.
- 2) Васильев Е.А., Устинов В.Н., Лешуков С.И. Кристаллы алмаза кимберлитовой трубки им. В. Гриба: морфология и структурно-химические особенности // Литосфера. — 2023. — Т. 23. — № 4. — С. 549-563.
- 3) Симakov С.К. Образование углерода в мантийном флюиде при взаимодействии азота с метаном // ДАН СССР. — 1983. — Т. 268. — № 1. — С. 206-210.
- 4) Устинов В.Н., Неручев С.С., Загайный А.К. и др. Алмазоносность севера Восточно-Европейской платформы. СПб: Наука. — 2021. — 410 с.
- 5) Хачатрян Г.К., Анашкина Н.Е., Барышев А.Н. Распределение структурных примесей в алмазах из кимберлитовых трубок с различной алмазоносностью // Отечественная Геология. — 2022. — № 5. — С. 3-13.
- 6) Banas A., Stachel T., Stern R.A. et al. Can microdiamonds be used to predict the distribution of large Type IIa macrodiamonds? // *Extended Abstract 11IKC*. — 2017. — 4891.
- 7) Bowen, D.C., Ferraris, R.D., Palmer C.E. et al. 2009. On the unusual characteristics of the diamonds from the Letseng-la-terai kimberlites, Lesotho // *Lithos*. 2009. — V. 112. — S 2. — P. 767-774.
- 8) Chasse M., Griffin W.L., Alard O. et al. 2018. Insights into the mantle geochemistry of scandium from a meta-analysis of garnet data // *Lithos*. 2018. — V. 310-3112. — P. 409-421.
- 9) Deines P., Harris J.W., Spear P.M. et al. Nitrogen and C content of finsh and premier diamonds and their implications // *Geoch. Cosm. Acta*. — 1989. — V. 53. — № 6. — P. 1367-1378.
- 10) Ferraris R. Largest rough diamonds — a list. / *Presentation at Kimberley International Diamond Symposium (KIDS 2023)*. — 2023. — 34 p.
- 11) Gaillou E., Post J.E., Rost D. et al. Boron in natural type IIb diamonds: chemical and spectroscopic measurements // *Am. Mineral*. — 2012. — V. 97. — № 1. — P. 1-18.
- 12) Gurney J.J., Harris I.W., Rickard R.S. et al. Inclusions in Premier mine diamonds // *Trans. Geol. Soc. S. Afr.* — 1985. — V. 88. — № 2. — P. 301-310.
- 13) Gurney J.J., Helmstaedt H.H. Type IIA diamonds and their enhanced economic significance // *Extended Abstracts 10 IKC*. 2012. — Unpaginated.
- 14) Lensky N.G., Niebo R.W., Holloway J.R. et al. Bubble nucleation as a trigger for xenolith entrapment in mantle melts // *Earth Plan. Sci. Lett.* — 2006. — V. 245. — Is. 1-2. — P. 278-288.
- 15) Levinson A.A., Gurney J.J., Kirkley M.B. Diamond sources and production: past, present, and future // *Gems Gemol.* — 1992. — V. 28. — № 2. — P. 234-254.
- 16) Milledge H.J., Mendelsohn M.J., Seal M. et al. Carbon isotopic variation in spectral Type II Diamonds // *Nature*. — 1983. — V. 303. — P. 791-792.
- 17) Moore, A.E. The origin of large irregular gem-quality type II diamonds and the rarity of blue type IIB varieties // *S. Afr. J. Geol.* — 2014. — V. 117. — № 2. — P. 219-236.
- 18) Moore, A.E. 2009. Type II diamonds: Flamboyant Megacrysts? // *S. Afr. J. Geol.* — 2009. — V. 112. — № 1. — P. 23-38.
- 19) Nakamura D. A new formulation of garnet-clinopyroxene geothermometer based on accumulation and statistical analysis of a large experimental data set // *J. Metam. Geol.* — 2009. — V. 27. — Is. 7. — P. 495-508.

- 20) Shirey S.B., Wagner L.S., Walter M.J. et al. *Slab transport of fluids to deep focus earth-quake Depths - Thermal modelling constraints and evidence from diamonds* // AGU Advances. 2020. V.2. Is. 2. e2020AV000304.
- 21) Simakov S.K. *On the origin of large type Ila gem diamonds* // Ore Geol. Rev. 2018. V. 102. P 195-203.
- 22) Simakov S.K. 2008. *Garnet-clinopyroxene and clinopyroxene geothermobarometry of deep mantle and crust eclogites and peridotites* // Lithos. 2008. V. 106. № 1/3. P. 125-136.
- 23) Simakov S.K. *Redox state of eclogites and peridotites from sub-cratonic upper mantle and a connection with diamond genesis* // Contrib. Mineral. Petrol. 2006. V. 151. № 3/4. P. 282-296.
- 24) Simakov S.K., Stegnitsky Yu. *A new pyrope-based mineralogical-petrological method for identifying the diamond potential of kimberlite/lamproite deposits* // Ore Ener. Res. Geol. 2021. V.7. 100013.
- 25) Simakov S.K., Scribano V., Melnik N.N. et al. *Nano and Micro Diamond Formation in Nature Ultrafine Carbon Particles on Earth and Space. Springer Briefs in Earth Sciences.* 2023. 132 P.
- 26) Smith E.M., Shirey S.B., Nestola F. et al. *Large gem diamonds from metallic liquid in Earth's deep mantle* // Science. 2016. V. 354. Is. 6318. P. 1403-1405.
- 27) Smith E.M., Shirey S.B., Wang W. *The very deep origin of the world's biggest diamonds* // Gems Gemol. 2017. Vol. 53. No.4. P. 388-403.
- 28) Sokol A.G., Tomilenko A.A., Bul'bak T.A. et al. *Carbon and nitrogen speciation in nitrogen-rich C-O-H-N fluids at 5.5–7.8 GPa* // Earth Plan. Sci. Lett. 2017. V. 460. P. 234-243.
- 29) Zhang C., Duan Z.H. *GFluid: An Excel spreadsheet for investigating C-O-H fluid composition under high temperatures and pressures* // Comp. Geosc. 2010. V. 36. P. 569-572.

## КОНЦЕПЦИЯ РУДООБРАЗОВАНИЯ И НОВЫЕ КРИТЕРИИ ВЫЯВЛЕНИЯ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВИТИМСКОГО ТИПА

Солодов И.Н. – 1, Нестерова М.В. – 2

1 – АО «Росатом Недра», 2 – ИГЕМ РАН, Москва

### Введение

В начале 1970-х годов шла острая дискуссия о том, какой рудоформирующий процесс при образовании экзогенных эпигенетических урановых месторождений преобладающий – окислительный («О») или восстановительный («В»). Дальнейшими исследованиями было доказано, что большинство пластово-инфильтрационных месторождений [7], образующихся в подвижном восстановительном геохимическом барьере на окончании региональных зон пластового окисления на месторождениях Притяньшаньской мегапровинции, относятся к месторождениям с рудами «О». До сих пор считается, что гидрогенные урановые месторождения с рудами «В» являются экзотикой.

Исследования на близосовременных (<12,5 Ма) палеодолинных месторождениях Хиагдинского рудного поля (ХРП) Витимского уранового рудного района (ВУРР) в Республике Бурятия позволяют сделать осторожный вывод о том, что урановые руды месторождений витимского типа являются рудами «В». Они формируются в постоянном и неподвижном восстановительном геохимическом барьере, а процессы грунтового и пластового окисления инфильтрационными водами не являются рудоформирующими, а выступают в роли рудоподготовительного окислительного процесса, выщелачивания урана из коры выветривания гранитов и переноса его в растворенном виде в зону восстановительного осаждения. Доказательству существования этого процесса рудообразования посвящен данный доклад.

### Эксфильтрация глубинных углекислых подземных вод – главный рудоформирующий фактор

Углекислые гидрокарбонатно-магниево-натриевые подземные воды обнаружены на месторождениях урана ХРП [10]. 37 урановых рудных залежей 8 месторождений локализованы в миоценовых аллювиальных песчано-гравийных отложениях в речных палеодолинах, врезаемых в гранитный фундамент на склонах Байсиханского поднятия (рис. 1). Сверху рудоносные горизонты перекрыты слабопроницаемыми болотно-озерными отложениями с прослоями вулканитов основного состава. Завершает разрез базальтовый покров мощностью до 150 м. Выходы гранитного скального основания сохранились в центральной части Байсиханского поднятия (рис. 1), которые играют роль местной области питания рудоносных горизонтов инфильтрационными метеорными водами.

Схема современного инфильтрационно-эксфильтрационного питания подземных вод в рудоносных водоносных горизонтах на склонах поднятия представлена на рис. 2. Региональный поток метеогенных вод, восходящий по тектонически ослабленным зонам гранитного фундамента на Байсиханском поднятии, формируется в области Икатского хребта. Максимальный перепад высот между хребтом и поднятием составляет 1300 м. Икатский хребет – региональная область питания и создания напора в подземных водах



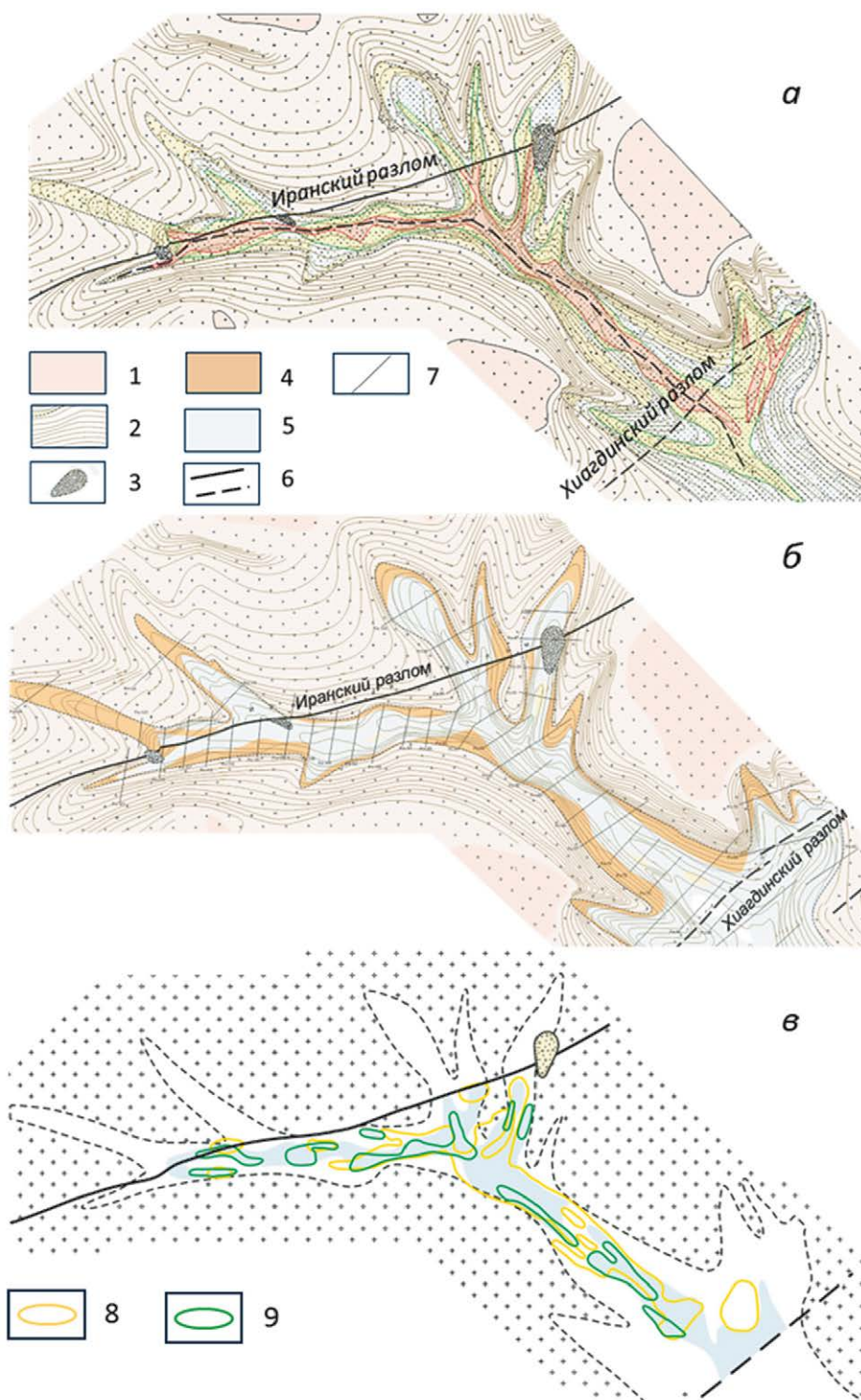


Рис. 3. Геолого-структурная карта месторождения Вершинное (а), осветление и обеление рудовмещающих аллювиальных отложений (б) и пород вулканогенно-осадочной толщи (в). По материалам ГРП 2009-2013 гг.

1 – позднепалеозойские розовые лейкократовые биотит-роговообманковые граниты; 2 – изолинии рельефа гранитного фундамента; 3 – вулканический аппарат; 4 – балансовые урановые руды в миоценовых аллювиальных отложениях; 5 – осветленные осадочные породы в рудоносном (б) и надрудном (в) водоносных горизонтах (на карте «в» показаны светло-голубым цветом); 6 – зоны разломов установленные и предполагаемые; 7 – контур палеодолины; 8 – контур окисленных пород; 9 – проявления урановой минерализации



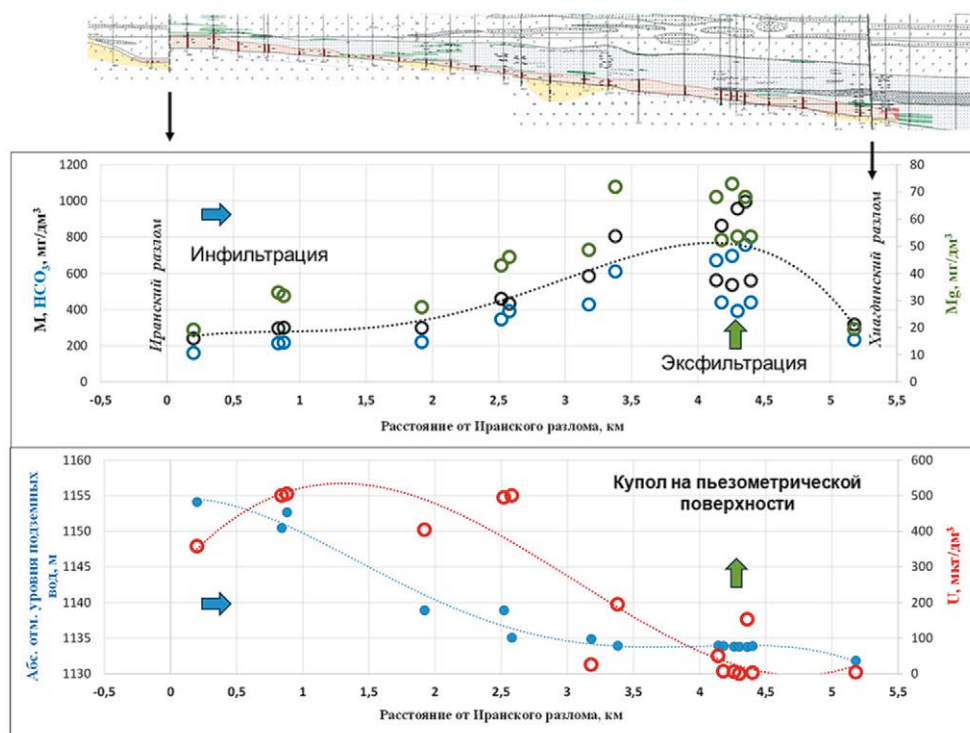


Рис. 4. Изменение вдоль продольного разреза рудоносного горизонта (см. рис. 3а) месторождения Вершинное содержания гидрокарбоната, магния и урана в подземных водах и абсолютных отметок их пьезометрической поверхности

Наиболее детально эксфильтрация углекислых подземных вод изучена на месторождении Вершинное (рис. 3а). Между гидрокарбонатом и магнием подземных вод существует идеальная прямая зависимость [9], что является одним из доказательств существования восходящего из фундамента и разгружающегося в рудоносный горизонт потока углекислых глубинных вод. С аномальными содержаниями гидрокарбоната и магния в углекислых подземных водах ХРП связано современное накопление урана в восстановительном геохимическом барьере (рис. 4). Содержание урана в подземных водах в верховье палеодолины около  $500 \text{ мкг/дм}^3$ , в нижней части палеодолины снижается до  $2 \text{ мкг/дм}^3$ . Гидрокарбонатно-магниевая аномалия в пространстве точно совпадает с участком выполаживания пьезометрической поверхности и появления на ней небольшого купола в нижней части палеодолины. В области аномалии обнаружены самые богатые урановые руды и аномалия углеводородов в почвенном покрове [10]. На коротком расстоянии – 5,5 км – контрастно изменяется минерализация подземных вод: в верховье –  $240 \text{ мг/дм}^3$ , в зоне гидрогеохимической и гидродинамической аномалий возрастает до  $990 \text{ мг/дм}^3$ .

Установлено сквозное проникновение углеводородов от зоны дезинтеграции коры выветривания гранитов до почвенного покрова [10]. Сделано предположение, что контрастную восстановительную обстановку в зоне рудонакопления ( $Eh -400...-300 \text{ мВ}$ ) создает пара – углеводороды + водородные бактерии. Преобладает мнение, что углеводороды из-за гидрофобных свойств и крайне низкой растворимости в воде не являются восстановителями, но они служат питательным и энергетическим субстратом для водородных бактерий, продуктом метаболизма которых является сильный восстано-



витель — атомарный водород. На протекание этого процесса указывает установленная ассоциация микронных выделений углеродистого вещества, которое фосфаты урана как бы обволакивают [11].

В результате проведенных на месторождении Вершинное исследований сделан вывод о рудосохраняющей роли углекислых подземных вод, обладающих высокой восстановительной способностью. Предполагается, что осветление гранитов, рудоносных аллювиальных отложений, вулканогенно-осадочной толщи и базальтового покрова обусловлено воздействием на них углекислых глубинных вод.

### Осветление гранитов, рудоносных отложений, вулканогенно-осадочной толщи и базальтов

На экзогенных эпигенетических месторождениях урана палеодолинного типа по-видимому, первыми, детально описали осветление рудоносных аллювиальных отложений на мезозойском месторождении Семизбайское И.А. Кондратьева, Л.Л. Боброва и И.Г. Максимова [5], назвав этот процесс *вторичным эпигенетическим восстановлением*. Также было обращено внимание на влияние этого процесса на локализацию урановых руд. В последующем осветление пород фундамента и рудовмещающих аллювиальных отложений было изучено минералого-геохимическими методами практически на всех древних (90-135 млн лет) палеодолинных месторождениях Урало-Енисейского ураноносного пояса.

Осветление пород на месторождении Вершинное проявлено во всем геологическом разрезе (рис. 5).

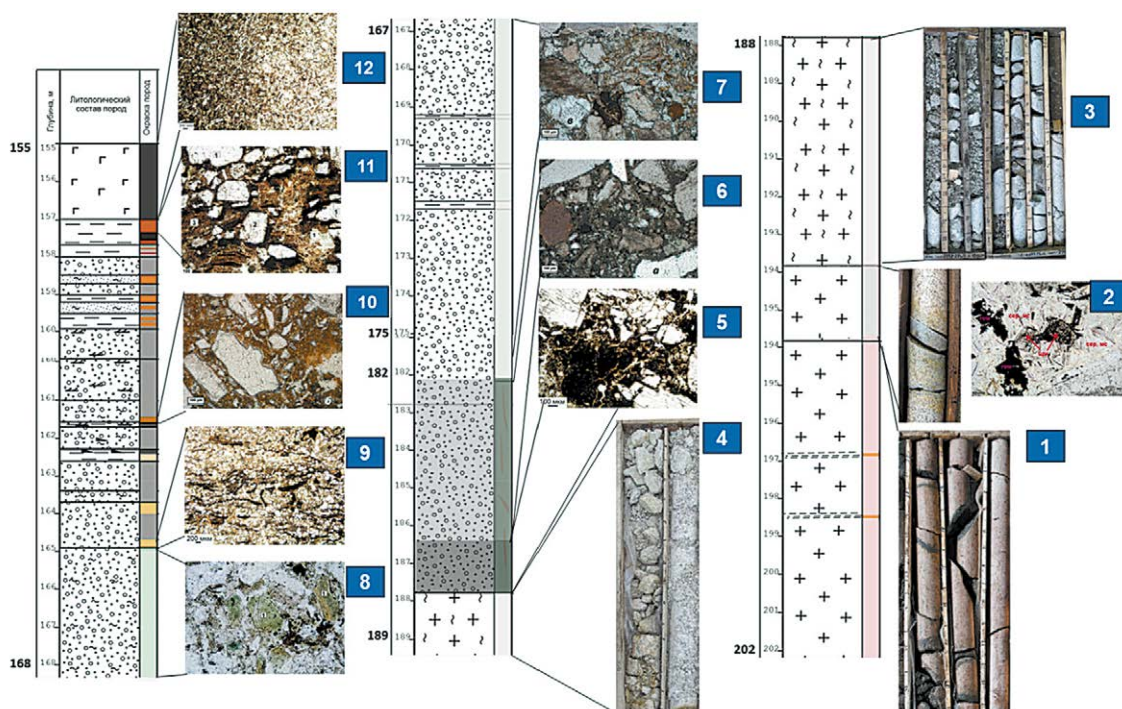


Рис. 5. Сквозное осветление, вплоть до обеления: розовых лейкократовых биотит-роговообманковых гранитов (1); объемное обеление белых гранитов с серовато-зеленоватым оттенком (2); каолинизированной коры выветривания (3-4); рудоносных серых (5) и темно-серых (6) и осветленных светло-серых (7) песчано-гравийных аллювиальных отложений; безрудных белых с зеленоватым оттенком (8); осветленных желтых (9) и первичных буроцветов (10 и 11) песчаных разнотернистых песков; черных оливин-пироксеновых базальтов по стенкам трещин (12). Съемка прозрачных шлифов выполнена в проходящем свете

**Граниты.** Среди витимканских гранитов преобладают розовые биотит-роговообманковые порфиоровидные и среднезернистые лейкократовые граниты (см. рис. 5-1). Розовый цвет им придает микроклин. Минеральный состав гранитов варьирует незначительно: микроклин – 20-30%; натриевый плагиоклаз – 20-25%; кварц – 15-20%; биотит – 5-10%; роговая обманка – 5-10%; акцессорные минералы (циркон, сфен, магнетит, монацит, ксенотим, апатит) – 2-5%. Трещины в розовых гранитах заполнены песчано-глинистым материалом, пропитанным битумом (см. рис. 5-1). Присутствие углеводородов служит доказательством миграции в трещинной среде гранитов углекислых подземных вод, содержащих углеводороды нефтяного ряда.

Объемное обеление розовых гранитов (см. рис. 5-2) произошло в результате альбитизации микроклина, замещения биотита мусковитом и серицитом, а также слабой хлоритизации биотита. Все эти изменения связаны с дорудным мезозойским периодом тектономагматической активизации. Наиболее вероятно, что это является следствием воздействия телетермальных углекислых растворов, образующихся в процессе гранитизации.

Фоновое содержание урана в розовых гранитах – 5 г/т. В результате альбитизации и хлоритизации граниты обогащаются ураном. Гидротермально измененные светло-серые с зеленоватым оттенком граниты содержат 20-160 г/т урана. Объемное обеление гранитов и обогащение их ураном – это начальный рудоподготовительный этап. При этом на стенках трещин обеленных гранитов также присутствуют эпигенетические скопления урана, образующие ассоциацию с битумоидами и сидеритом [10, 11].

Преобразование гранитов в результате гидротермальных и гипергенных окислительных процессов приводит к росту содержания в них железа и снижению содержания кремния, натрия и особенно калия.

Кора выветривания гранитов имеет типичное зональное строение: зона дезинтеграции, состоящая из глыбово-щебенистого материала (см. рис. 5-3); начальных и полных глинистых изменений (см. рис. 5-4). Формирование коры происходило в течение 70 млн лет с верхнего мела по олигоцен в период тектонического покоя. Согласно минералогическим, минералого-морфологическим, структурно-геологическим критериям [1], признаков гидротермальной аргиллизации в корах выветривания на месторождениях ХРП не обнаружено. Это обстоятельство позволяет исключить гидротермальный фактор в освещении вышележающих рудовмещающих аллювиальных отложений.

**Рудовмещающие осадочные отложения** джилиндинской свиты характеризуются большим разнообразием литологического состава и содержания органического вещества. В краевых частях палеодолины В1 и овражно-балочной сети 6-ти левых и 2-х правых притоков преобладают делювиально-пролювиальные комплексы ( $C_{орг}$  0,5-5,0 %); наиболее широко распространенные русловые фации представлены пойменными глинисто-алевритовыми песками ( $C_{орг}$  1-4 %) и стречневыми песками с гравием и галькой ( $C_{орг}$  0,1-0,3 %, в единичных пробах до 4,2 %); пойменные, старичные фации – мелкозернистые пески, алевриты и глины ( $C_{орг}$  от 2-3 до 21-25 %); болотные фации – преимущественно тонкообломочные отложения с растительным детритом, фрагментами растений и торфом ( $C_{орг}$  до 20-30 %). Наиболее богатые урановые руды с площадной удельной продуктивностью до 50-75 кг  $U/m^2$  локализованы в песках с гравием и галькой стречневой фации в тальвегах палеооврагов (преобладающие содержания  $C_{орг}$  0,1-0,3 %). В болотно-озерных отложениях верхней джилиндинской подсвиты с высоким содержанием  $C_{орг}$  (до 20-30 %) обнаружены лишь локальные участки с урановой минерализацией, не имеющей промышленного значения (см. рис. 3в).

Во всем многообразии литолого-фациального состава осадков наблюдаются закономерности их распределения. Верховье палеодолины В1 и ее прибортовые части полностью или в значительной степени выполнены пролювиально-делювиальными отложениями. В средней части палеодолины преобладают аллювиальные осадки, а в нижней – аллювиальные и озерные отложения. Мощность терригенных отложений изменяется от первых метров до 55 м и закономерно увеличивается от бортов к центру и вниз от верховья к низовью палеодолины.

Для аллювиальных отложений характерен аркозовый состав, отсутствие литификации, слабая окатанность и плохая сортированность обломочного материала, почти отсутствуют карбонаты. Содержание  $CO_2$  не превышает 0,1 %; в единичных пробах песков, отобранных, как правило, вблизи подошвы базальтов,  $CO_2$  увеличивается до 0,8-5,6 %; в глинах – до 6,5 %. Увеличение содержания  $CO_2$  в аллювиальных отложениях в направлении от подошвы к кровле рудоносного горизонта указывает на то, что в этом направлении происходило падение гидростатического и, как следствие, парциального давления  $CO_2$ . Источником образования карбонатов (в основном сидеритов) являлись железистые глубинные углекислые подземные воды. Глинистая составляющая осадков представлена каолинитом, в меньшей степени гидрослюдами. Базальный слой аллювия обогащен ураном. Содержания урана, преимущественно в виде фосфатов, достигают 3,5%.

Первичные сероцветные аллювиальные рудоносные отложения (см. рис. 3-5 и 3-6) состоят из продуктов выветривания и дезинтеграции пород кристаллического фундамента. Обломочные зерна представлены кварцем, микроклином и их сростками. Кварц (20 %), плагиоклаз (10-15 %) и микроклин (40-55 %) в сумме составляют 70-90 %. Биотит – 2-3 %. Обломки гранита – 5-7 %. Микроклин из крупнозернистых гранитов иногда интенсивно альбитизирован. Из темноцветных минералов редко отмечается вкрапленность разложившейся роговой обманки и в различной степени сохранности биотита, а также биогенного фрамбоидального пирита в ассоциации с углефицированной органикой. Вблизи скоплений биотита отмечаются включения сфена, циркона, апатита, магнетита. В нижних частях разреза появляется окисленный хлорит, развитый по биотиту. Углефицированные растительные остатки – 0,1-2,0 %.

Масштаб осветления рудовмещающих аллювиальных отложений в плане (см. рис. 3б) и в разрезе, в направлении от верховья (Иранский разлом) к низовью (Хиагдинский разлом) палеодолины В1, хорошо виден на разрезах по разведочным линиям (РЛ) (рис. 6). Зоны осветления откартированы по данным полевой документации керн разведочных скважин.

Следует обратить внимание на отсутствие или слабое осветление примыкающих к зоне рудовмещающих отложений в пределах Иранского (РЛ 121) и Хиагдинского разломов (РЛ 66). В нижней части палеодолины, наиболее обогащенной ураном, где обнаружены гидрокарбонатно-магниева аномалия в подземных водах (см. рис. 4) и аномалия углеводородов в почвенном покрове [10], преобладает сплошное осветление рудовмещающих отложений (РЛ 83). Это свидетельствует о том, что проникновение углекислых вод происходило и продолжает происходить по тектонически ослабленным зонам в тальвеге палеодолины, а не по зонам Иранского и Хиагдинского разломов.

Грунтовое окисление гранитов и частично терригенных отложений в основном проявлено в прибортовой части палеодолины (рис. 6).

Механизм осветления терригенных отложений может быть охарактеризован следующими процессами.

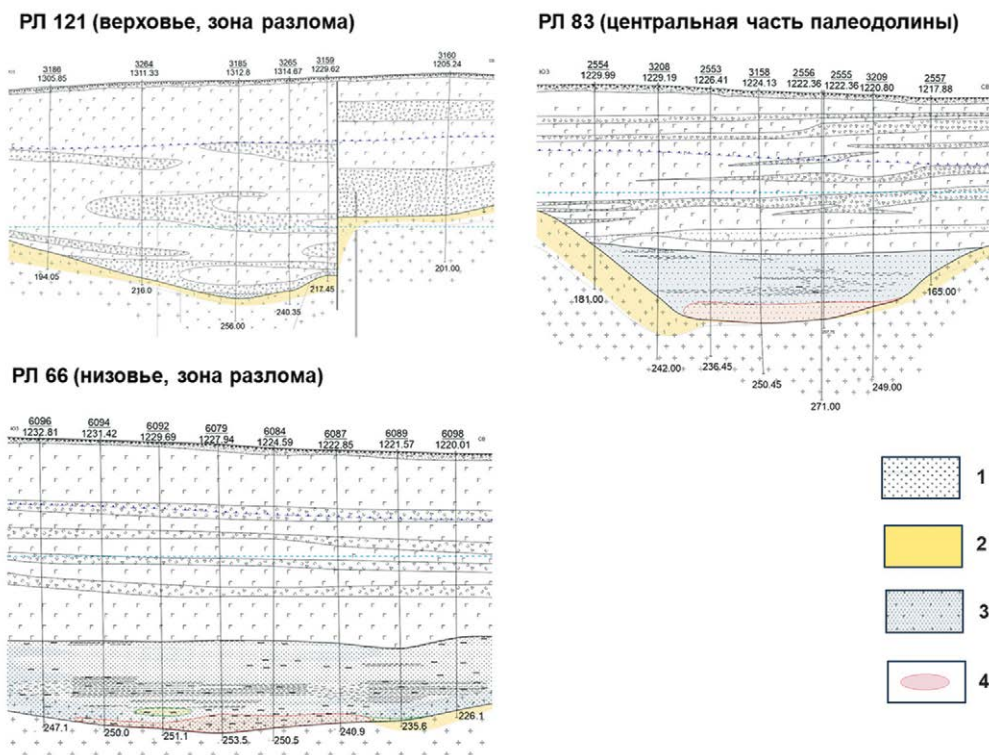


Рис. 6. Осветление рудовмещающих отложений в направлении от верховья к низовью палеодолины

1 — первично восстановленные сероцветные отложения; 2 — зона грунтового окисления; 3 — осветленные аллювиальные отложения; 4 — сероцветные рудоносные отложения (балансовые руды)

На гидрогенных месторождениях урана в рудообразующей системе возникают два кислотных агента — серная и угольная кислоты.

Серная кислота образуется в результате окисления сульфидов железа при участии метеорного кислорода и аэробных железобактерий. Это очень слабый источник, так как содержание пирита и марказита в сероцветных отложениях не превышает 1-2 %. Кислота образуется непосредственно вблизи зерен сульфидов и незначительно воздействует на примыкающие к ним породообразующие минералы. На зернах калиевых полевых шпатов образуются пленки микронного размера каолинита и отмечается слабая каолинизация краевых частей расщепленных лейст биотита. Образование серной кислоты — одnorазовый процесс.

Окисление сероцветных отложений с участием и без участия серной кислоты охватывает все минералы, содержащие металлическое и двухвалентное железо. При этом  $pH$  подземных вод сохраняется на уровне близнеутральных значений, редко снижающийся до 6,5. В этих кислотно-щелочных условиях  $Fe(III)$  остается на месте окисления, не мигрируя при начале гидролиза его гидроксида при  $pH > 2,3$ .

Угольная кислота, в отличие от сильной серной кислоты, слабая, но ее воздействие на граниты, аллювиальные терригенные отложения, вулканогенно-осадочную толщу и перекрывающие их базальты значительно более мощное, так как представляет собой постоянно действующий источник на месторождениях ХРП.

Ближайшим геолого-гидрогеологическим аналогом месторождений ХРП является месторождение холодных минеральных углекислых вод Мухен в Хабаровском крае [12]. Здесь также водоносный горизонт, сложенный миоценовыми аллювиальными

песчано-гравийными щебенистыми отложениями и вмещающий минеральные воды, залегает на глинистой коре выветривания позднепалеозойских гранитов. Сверху горизонт перекрыт базальтовым покровом. Тип месторождения – гидроинжекционный (эксфильтрационный). Химический состав подземных вод близок к составу подземных вод в рудоносном горизонте месторождения Вершинное –  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ , минерализация до 1,7 г/л; железистые ( $\text{Fe}^{2+}$  до 13 мг/л),  $\text{Mn}^{2+}$  до 0,6 мг/л,  $\text{Ba}^{2+}$  до 0,2 мг/л,  $\text{SiO}_2$  около 80 мг/л.

На месторождении Мухен также обнаружено осветление отложений водоносного горизонта, которое автором работы [12] объясняется воздействием на них глубинных углекислых вод. Это подтверждено результатами компьютерного физико-химического моделирования по определению степени насыщенности ( $I/S$ ) подземных вод по отношению к типоморфным и петрогенным минералам. Установлено, что минеральные воды неравновесны по отношению к основным порообразующим минералам. При этом минеральные воды находятся в равновесии с глинистыми минералами. Воды состава  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$  не насыщены по отношению ко всем карбонатным минералам за исключением сидерита. Они также не насыщены по отношению к гипсу:  $I/S$  -3,6, анортиту -5,7, альбиту -2,0, калиевому полевоому шпату -1,4. Воды пересыщены кварцем ( $I/S$  1,1), глинистыми минералами ( $I/S$  каолинита 7,9) и сидеритом (0,7). Пересыщение по отношению к сидериту связано с высоким содержанием двухвалентного железа и схоже с этим процессом на характеризуемом месторождении. Кремнезем удаляется из воды путем осаждения вторичного кварца, который заполняет пустоты водовмещающих пород.

На месторождении Вершинное не осветляются серые и темно-серые рудоносные первично восстановленные отложения в основании аллювиальной толщи (см. рис. 5-5 и 5-6), т.к. через них фильтровались и продолжают фильтроваться углекислые глубинные воды с эпигенетическими восстановителями (сероводород, углеводороды). В них лишь происходит накопление урана, образование кристаллического и фрамбоидального пирита.

В первичных буроцветах, выше оруденелых сероцветов, происходило восстановление в первую очередь  $\text{Fe(III)}$  до  $\text{Fe(II)}$ , у которого  $pH$  начала гидролиза  $>6,0$  и  $\text{Fe(II)}$  становилось подвижным в углекислых подземных водах с  $pH \sim 5,5$ . Часть  $\text{Fe(II)}$  осаждается при образовании сидерита и эпигенетических сульфидов при взаимодействии с сероводородом углекислых вод. Основная масса  $\text{Fe(II)}$  в растворенном виде выносится из горизонта потоком подземных вод в область разгрузки. Об этом свидетельствует установленный факт – углекислые воды на месторождении ХРП железистые с содержанием  $\text{Fe(II)}$ , достигающим десятков и сотен миллиграммов в литре [9].

Таким образом, собственно процесс восстановления не приводит к осветлению кристаллических и осадочных пород. Наоборот, восстановление всегда сопровождается потемнением и образованием сероцветов. Восстановление – это лишь подготовительный этап, предшествующий осветлению. Оно переводит прежде всего железо и марганец в подвижное низковалентное состояние. А собственно осветление вплоть до обеления – это выщелачивание железа, марганца и других петрогенных элементов из терригенных отложений углекислыми водами.

**Вулканогенно-осадочная толща.** Локальные зоны осветления обнаружены и в пределах вулканогенно-осадочной толщи (см. рис. 3б), перекрывающей аллювиальные отложения. Они, по-видимому, связаны с проникновением углекислых глубинных вод через тектонические нарушения низшего порядка в периоды повышенной тектонической активности.

**Базальты.** Базальтовый магматизм в пределах Байсыханского поднятия протекал в четыре этапа – в период с 9,5 до 0,6 млн лет назад [8]. Наиболее интенсивная тектономагматическая активизация проявилась в период последних двух циклов (5,0-3,0 и 1,8-0,6 Ма), когда значительная часть территории Байсыханского поднятия была покрыта базальтовым покровом. Только в центральной части поднятия сохранились выходы гранитоидов, вулканогенно-осадочной и осадочной толщ джилиндинской свиты на поверхность.

На месторождении Вершинное при изучении рентгенофазовым анализом в сочетании с электронной микроскопией в белом тонком слое (0,5 см) на плоскостях трещин черного оливин-пироксенового базальта, в серых и белоцветных новообразованиях обнаружены галлуазит, метагаллуазит, монтмориллонит, фосфаты урана и микронные выделения углеродистого вещества [11]. В переходной серой зоне между первичными черными базальтами и полностью обеленными базальтами (см. рис. 5-12) отмечается обилие выделений сидерита и кальцита [11].

На палеодолинном месторождении Октябрьское Витимского УРР при оценке баланса вещества определено, что обеление базальтов сопровождается тотальным выносом элементов в оксидной форме (%):  $FeO$  – 96;  $MgO$  – 90,  $CaO$  – 70,  $Fe_2O_3$  – 65,  $Na_2O$  – 40,  $SiO_2$  – 40, сопровождающееся обогащением титаном и алюминием [6]. В обеленных базальтах установлены обычные для месторождений ХРП содержания урана 0,0п – 0,п, концентрирующиеся исключительно в каймах осветления.

Обеление базальтов носит дискуссионный характер. Одни авторы считают этот процесс гипергенным, другие – гидротермальным. Мы придерживаемся гипергенной природы обеления вулканитов основного состава. Базальтовые лавы быстро остывают в течение нескольких месяцев, реже – нескольких лет [2, 3]. Масштабное и глубокое обеление базальтов не могло произойти за столь короткий геологический промежуток времени.

По данным бокового видеокаротажа [9] стенки трещин в черных базальтах обелены на всю глубину исследования (8-50 м) и местами покрыты корками охр гидрогетита. До оледенения 2,5 Ма назад метеорные воды инфильтровались в базальтовый водоносный горизонт и имел место наложенный процесс с участием углекислых подземных вод. На это указывает встречающаяся на поверхности трещин обеленных базальтов ассоциация – осветленная матрица + УВ + сидериты + фосфаты  $U(IV)$ . Сидеритизация свидетельствует о наличии контрастного восстановительного геохимического барьера ( $Eh < -300$  мВ).

Также как и авторы статьи [6], авторы данной работы при имеющейся информации не смогли объяснить происхождение источника урана в обеленных базальтах. Проникновение углекислых вод в вулканогенно-осадочную толщу и трещинную среду базальтов, вероятно, связано с периодами сейсмической и тектономагматической активизации.

### **Концептуальная модель рудообразования**

«Первичная» и «вторичная» окраски аллювиальных отложений, часто используемые при описании рудовмещающей толщи на месторождениях урана палеодолинного типа – довольно спорные и неоднозначные понятия.

Первичная окраска современных речных отложений бурая и обусловлена окислением железосодержащих минералов в открытой кислородной атмосфере среде (поверхностно окисленные буроцветы; см. рис. 5-9 – 5-11; рис. 7). Такими минералами, подвергшимися окислению, на характеризуемом объекте являются биотит, хлориты,



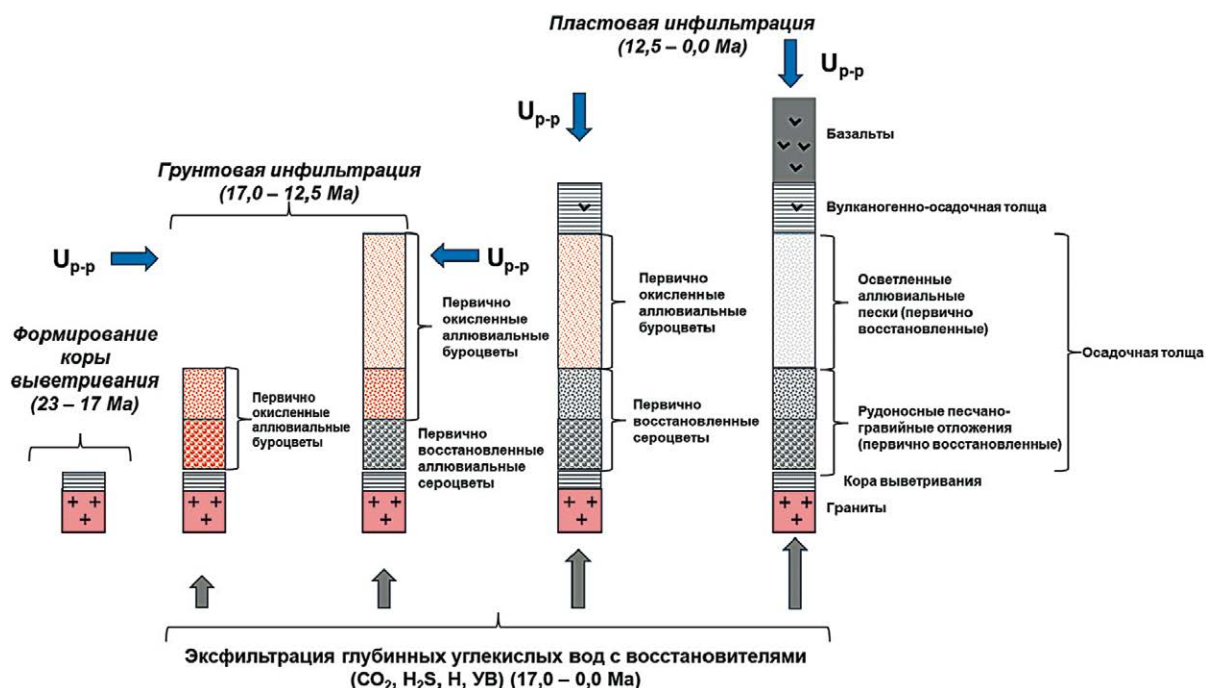


Рис. 7. Схематическое изображение эволюции инфильтрационно-эксфильтрационного уранового рудообразования на палеодолинных месторождениях витимского типа

роговая обманка, сульфиды железа и включения железосодержащих соединений в составе каолинита и гидрослюд.

По мере накопления наносов и увеличения мощности аллювия в базальных слоях на стадии седиментогенеза при резком замедлении фильтрации и сокращении поступления метеорного кислорода начинался процесс анаэробного микробного брожения, окислительная обстановка сменялась восстановительной и отложения приобретали первичный серый и темно-серый цвет (см. рис. 5-5, 5-6, 7). В это время в базальных слоях аллювиальной толщи начинал накапливаться уран в восстановительном геохимическом барьере.

Поэтому правильнее именно буроцветы в верхней части слоев горизонта и сероцветы в базальном слое считать первичными окрасками.

Важно повторно отметить, что, в отличие от классических пластово-инфильтрационных месторождений Притяньшаньской урановой рудной мегапровинции, образование осадочного чехла на месторождениях ХРП происходило в отсутствие платформенного этапа геологического развития территории, поскольку рельеф фундамента до начала накопления аллювия (17 Ма) сформировался в конце олигоцена (23 Ма).

Частичное перекрытие водопроницаемых миоценовых отложений рудоносного горизонта слабопроницаемыми озерно-болотными отложениями, начавшееся 12,5 млн лет назад, и несплошное распространение базальтового покрова в центральной части Байсыханского поднятия не привело к изоляции рудоносного горизонта. Центральная часть поднятия играла и продолжает играть роль местной области питания рудоносных водоносных горизонтов рудного поля (см. рис. 1). Гидродинамическая система продолжала оставаться открытой к воздушной атмосфере и поступление инфильтрационных кислородсодержащих вод происходило через выходы проницаемых отложений горизонта на дневную поверхность на расстоянии менее 2 км от осевой линии поднятия (см. рис. 1).

Именно постоянно восходящие из фундамента углекислые воды с восстановителями создавали и сохраняли в базальном слое аллювия восстановительную обстановку и способствовали накоплению урана, локализации рудных тел и препятствовали окислительному разрушению урановых руд. Сохранялась их первичная сероцветная окраска.

Поступление углекислых вод в рудоносный горизонт из гранитного фундамента, по-видимому, происходило на протяжении всего периода существования аллювиальных отложений – с 17 Ма по современное время. Генерация глубинного углекислого газа, начавшаяся в результате гранитизации в позднем палеозое, продолжается с разной интенсивностью до сих пор.

Наиболее активное поступление этих вод с эпигенетическими восстановителями, всего вероятнее, происходило в периоды тектономагматической активизации на территории Байсыханского поднятия – 9,5-0,6 Ма в ходе формирования вулканогенно-осадочной толщи и образования базальтового покрова. Это согласуется с выводом В.М. Зобина [4] о том, что в случае центрального извержения обычно происходит оживление уже существующих тектонических нарушений в земной коре, тогда как при латеральном извержении возникают новые трещины. Разведкой на территории Хиагдинского рудного поля выявлено 17 вулканических аппаратов центрального типа, в том числе три захороненных аппарата в районе 1, 2 и 4 левых притоков в главную палеодолину В1 месторождения Вершинное.

Можно предположить, что в этот же период усилилось масштабное осветление аллювиальных рудовмещающих отложений (см. рис. 3б и 6).

Грунтовое окисление гранитов и частично терригенных отложений в основном проявлено в прибортовой части палеодолины. Из этих участков, а также с верховья полеодолины поступал уран в составе грунтовых вод и накапливался в восстановительном геохимическом барьере в тальвеговой части палеодолины, откуда поступали восстановители урана в составе углекислых вод. После перекрытия аллювиальных отложений слабопроницаемыми озерно-болотными отложениями режим фильтрации инфильтрационных вод в рудоносном горизонте сменился с грунтового на пластовый (см. рис. 7) и уран преимущественно начал поступать в неподвижный восстановительный геохимический барьер с верховья палеодолины В1, как показано на рис. 4.

Перенесение теории образования пластово-инфильтрационных месторождений урана, созданной при многолетнем изучении месторождений в Центральном Кызылкумском урановом рудном районе, Сырдарьинской и Чу-Сарысуйской урановых рудных провинций, на месторождения палеодолинного витимского типа неприменимо при интерпретации результатов исследований, так как эти рудные объекты кардинально отличаются друг от друга (таблица).

### **Выводы**

1. На палеодолинных месторождениях витимского типа концентрирование урана происходит в постоянно действующем и неподвижном восстановительном геохимическом барьере.

2. Восстановителями урана выступают сингенетические (углистые растительные остатки) и эпигенетические (сероводород и углеводороды) твердые и растворенные вещества. Вторая группа восстановителей преобладающая.

3. Эпигенетические восстановители в составе углекислых подземных вод поступают (разгружаются) в рудоносные горизонты по тектонически ослабленным зонам в тальвегах палеодолин в результате восходящего (эксфильтрация) из фундамента потока.

Таблица. Ключевые отличия палеодолинных месторождений урана витимского типа от классических пластово-инфильтрационных месторождений

| Характеристика, параметр                                                                            | Молодые, палеодолинного типа (витимский тип)         | Пластово-инфильтрационные (притяньшаньский тип)                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Литологический тип рудоносных отложений                                                             | Аллювиальные                                         | Аллювиальные, лимнические, прибрежно-морские                                           |
| Расположение области питания рудоносного водоносного горизонта относительно урановых рудных залежей | Рядом с рудными телами                               | На значительном удалении от рудных тел                                                 |
| Источник урана относительно расположения урановых рудных залежей                                    | Совмещены и сближены в пространстве с рудными телами | Удален на значительное расстояние                                                      |
| Восстановительный геохимический барьер                                                              | Неподвижный, формируется вдоль потока подземных вод  | Подвижный, формируется ортогонально потоку подземных вод                               |
| Рудоконтролирующий процесс                                                                          | Восстановительный                                    | Окислительный                                                                          |
| Масштаб осветления рудовмещающих отложений                                                          | Намного превышает размеры рудных залежей             | Весьма локальная зона на границе желтоцветных и сероцветных отложений (зона “пробега”) |
| Морфология урановых рудных тел в разрезе                                                            | Преобладает линзовидная форма                        | Преобладает серповидная (ролловая) форма                                               |
| Урановая минерализация                                                                              | Преимущественно фосфаты урана                        | Оксиды и силикаты урана                                                                |

4. Воздействие эпигенетических восстановителей на терригенные рудовмещающие отложения переводит оксидное железо и марганец в растворимое низковалентное состояние, а выщелачивание этих и других петрогенных элементов углекислыми водами сопровождается осветлением и обелением осадочных пород.

5. Процессы грунтового и пластового окисления являются рудоподготовительными. Переводят уран в подвижное состояние и переносят его в растворенном состоянии в область неподвижного восстановительного геохимического барьера.

6. Рудоформирующим является восстановительный геохимический барьер.

7. Палеодолинные месторождения урана витимского типа следует, согласно предложению С.Ф. Винокурова, называть «инфильтрационно-эксфильтрационными».

8. Проведенные исследования позволяют предложить дополнительные новые критерии выявления урановых месторождений витимского типа:

- углеводороды нефтяного ряда в почвенном покрове;
- углекислые гидрокарбонатно-магниевые подземные воды с эпигенетическими восстановителями урана в рудоносных горизонтах;
- осветленные и обеленные аллювиальные отложения – будущие рудовмещающие.

9. Изучение рудообразования и, в частности, осветления, на близсовременных месторождениях урана витимского типа позволяет использовать установленные закономерности для реконструкции этого процесса на древних месторождениях Урало-Енисейского ураноносного пояса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Андреева О.В., Головин В.А., Омеляненко Б.И. К вопросу о критериях различия кор выветривания и гидротермальных аргиллизитов / В кн. «Метасоматизм и рудообразование». М.: Наука, 1984 – С. 180-189.
- 2) Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Морфология, закономерности формирования и остывания лавовых труб извержения вулкана Толбачик 2012-2013 гг. / Материалы XXII региональной научной конф. «Вулканизм и связанные с ним процессы». 2019. – С. 36-39.
- 3) Веденеева Е.А., Мельник О.Э., Уткин И.С. Охлаждение потока лавы, растекающейся по плоской поверхности // Вестн. МГУ, чер. 1. Математика, механика. – 2017. – № 4. – С. 36-39.
- 4) Зобин В.М. О соотношении очаговых параметров вулканических землетрясений при центральных и латеральных извержениях вулканов // Вулканология и сейсмология. – 1987. – № 2. – С. 81-88.
- 5) Кондратьева И.А., Боброва Л.Л., Максимова И.Г. Эпигенетические изменения рудовмещающих отложений и их роль в локализации уранового оруденения на Семизбайском месторождении // Мат-лы по геологии урановых м-ний. Вып. 70. – М.: ВИМС. – 1981. – С. 158-175.
- 6) Коченов А.В., Халдей А.Е., Халезов А.Б., Шагарова В.Б. Необычные случаи концентрации урана в палеодолинах // Литология и полезн. ископ. – 1997. – № 3. – С. 331-336.
- 7) Максимова М.Ф., Шмариович Е.М. Пластово-инфильтрационное рудообразование. М.: Недра. – 1993. – 160 с.
- 8) Рассказов С.В., Лямина Н.А., Черняева Г.П. и др. Стратиграфия кайнозоя Витимского плоскогорья: феномен длительного рифтогенеза на юге Восточной Сибири. Ин-т земной коры СО РАН. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. – 193 с.
- 9) Солодов И.Н., Нестерова М.В. Углекислые подземные воды – рудосохраняющий фактор на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля (Республика Бурятия) // Геология рудных месторождений. – 2022. – Т. 64. – № 1. – С. 151-162.
- 10) Солодов И.Н., Нестерова М.В. Распространенность углекислых подземных вод и углеводородов на месторождениях урана Хиагдинского рудного поля (Республика Бурятия) // Геология рудных месторождений – 2023. – Т. 65. – № 6. – С. 495-508.
- 11) Тарханова Г.А., Дубинчук В.Т., Чистякова Н.И. и др. Особенности минерального состава и условия формирования руд Вершинного месторождения // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 6. – С. 7-13.
- 12) Харитоновна Н.А. Углекислые минеральные воды Северо-Востока Азии: происхождение и эволюция / Дис. ... доктора геол-мин.наук. Томск, 2013. – 321 с.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА КРУТОНАКЛОННОМ И ВЕРТИКАЛЬНОМ РЕЛЬЕФЕ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА МВР (МЕТОД ВЕРТИКАЛЬНОЙ РАЗВЕДКИ)

Сычев В.Ю.

ООО «Travel 01», Москва

### Актуальность темы

В настоящее время и в современных реалиях наша страна сталкивается с беспрецедентными вызовами в условиях формирования многополярного мира и как никогда нуждается в максимально эффективном освоении природных ресурсов на всех этапах геолого-разведывательного процесса от поисков до добычи. Возникает острая необходимость внедрения современных и инновационных методов поисков и разведки МПИ, позволяющих проводить необходимые исследовательские работы с наибольшей эффективностью. Метод вертикальной разведки (МВР) включает в себя нестандартный инновационный подход при решении поисковых и разведочных задач на крутонаклонном и вертикальном рельефе, позволяющий проводить работы на участках, ранее недоступных для геологов: крутонаклонные осыпи, вертикальные стенки, отвесы, каменные выступы и прочие скальные образования (рис. 1). С помощью специальной веревочной техники появляются, без преувеличения, колоссальные возможности проводить комплекс всех основных геолого-геофизических измерений: расчистка и документирование (с зарисовкой) горных выработок, литохимическое сколовое опробование, геохимическое опробование по ВОР, радиометрия, подтверждение или опровержение экономической целесообразности проведения более дорогих исследований на конкретном участке и т.д.

Сразу же следует отметить, что применение метода МВР при соблюдении всех необходимых правил техники безопасности полностью безопасно и соответствует всем нормам и требованиям, необходимым при проведении верхолазных работ; используется исключительно сертифицированное оборудование и снаряжение.

**Цель метода:** поиски, разведка и последующее освоение полезных ископаемых посредством метода МВР в условиях крутонаклонного и вертикального рельефа.

### Основные задачи метода МВР

- Определение наиболее перспективных рудопроявлений на вертикальном крутонаклонном рельефе.
- Расчистка крутонаклонных горных выработок с последующей их документацией и опробованием.
- Оценка экономической эффективности и целесообразности внедрения более дорогостоящих методов разведки в условиях крутонаклонного и вертикального рельефа.
- Сопоставление и сравнительный анализ с другими геолого-геофизическими методами поисков и разведки МПИ. Принцип комплексного изучения территории.

**Суть метода:** с помощью альпинистского и спелеологического снаряжения осуществляются необходимые геологические исследования: документация и фотодоку-

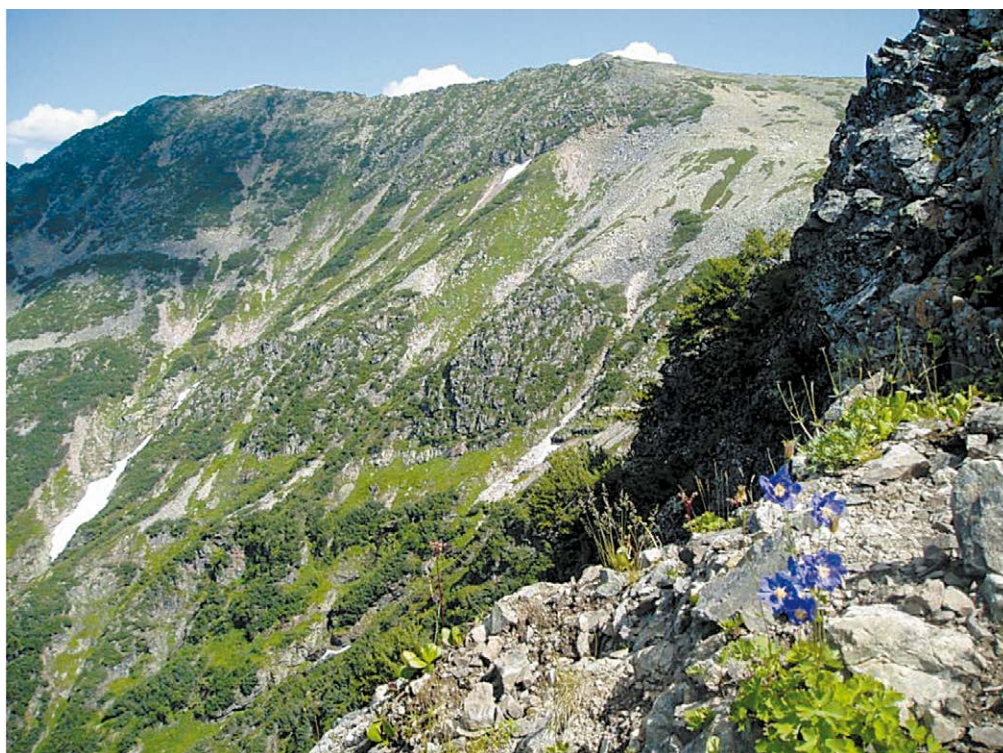


Рис. 1

ментация, пробоотбор, необходимые измерения с помощью специализированного оборудования (радиометрия) и т.д.

**Метод МВР включает в себя следующие этапы:**

- Выбор участка, предварительная подготовка.
- Организация навески посредством крепления и монтажа альпинисткой веревки к естественной опоре или скальной поверхности. Оборудование стационарных и промежуточных точек крепления.
- Проведение необходимых исследований непосредственно с навески.
- Получение результатов, обработка данных.

**Успешный опыт применения метода МВР**

В 2008 году силами геологов ФГУПП «Урангео», БФ «Сосновгеология» и ФГУП «ВИМС» на участке работ Дорожный (Акитканского рудного узла) с использованием метода МВР была проведена радиометрия локального участка отвесной стены на рудопоявлении «Мотылёк» — небольшое рудное тело на краю скального уступа площадью примерно 2 x 3 м с показаниями прибора (радиометр СРП 68-01) до 3000 мкР/ч на поверхности. Были проведены измерения вниз по отвесной скале (шаг измерений 50 см) с выходом в фоновые показания 40-50 мкР/ч, тем самым не подтвердив рудное тело на глубину с необходимыми параметрами, что позволило на данном проявлении отказаться от проведения дорогостоящих буровых работ (рис. 2). Экономический эффект метода МВР сложно переоценить.

**Планы в ближайшей перспективе по внедрению метода**

Определение базовой площадки. Подготовка проектного предложения по внедрению метода МВР. Написание проекта. Изучение потенциальных рудопоявлений, характеризующихся крутонаклонным или вертикальным рельефом. Создание геологического отряда вертикальной разведки (ГОВР). Обучение сотрудников.





Рис. 2. Проведение радиометрических измерений на скальном участке (Акитканский РУ, уч. Дорожный)

### **Заключение**

Освоение метода МВР в ближайшей перспективе позволит существенно повысить эффективность поисков и разведки урана и других ТПИ на крутонаклонном и вертикальном рельефе. Применение принципа комплексного изучения территории предоставит возможность не только интерпретировать цифровые данные геофизических методов, но и осуществлять прямую документацию и пробоотбор на представляющих интерес аномалиях, рудных зонах, продуктивных прослоях пород, ранее недоступных для геологов.

# ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВ ВЫЯВЛЕНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЮЖНОЙ АВСТРАЛИИ

Читалин А.Ф., Агапитов Д.Д.  
ООО «ИГТ-сервис», Москва

## Введение

В 2020 г. в штате Южная Австралия проводился открытый конкурс *Explore SA The Gawler Challenge* по применяемым методам прогнозирования рудных месторождений с использованием алгоритмов машинного обучения. Было зарегистрировано около 2000 участников из более чем 100 стран. По результатам рассмотрения представленных проектов компетентное жюри определило 8 призеров, получивших денежные призы. Команда специалистов ООО «ИГТ-сервис» (А.Ф. Читалин, Д.В. Сивков, Е.В. Фомичев, А.С. Михайлов, В.Ю. Чикатуева, С.С. Попов, Е.М. Гришин) с участием сотрудника компании *Digital Petroleum* Е.Е. Барабошкина (геолог, специалист по нейросетям) также принимала участие в конкурсе и заняла 9 место.

Жюри конкурса, рассмотрев предложенную нами методику и алгоритм прогнозирования месторождений [2], высоко оценило общий подход ООО «ИГТ-сервис», основанный на сбалансированном использовании геологии и машинного обучения, эвристический подход при анализе различных карт, использование линеamentного анализа геофизических карт: *«Your approach used a diverse set of data and models show good correlations with known deposits and locations with high similarity. Good overall approach, balancing geology and ML. Front-end of heuristics into maps and lineaments was an interesting choice»*<sup>1</sup>.

## Методика работы

Эффективное машинное обучение основано на надежном алгоритме и репрезентативных данных (в нашем случае – растровых картах с непрерывной раскраской), отражающих основные особенности известных месторождений. Чтобы предсказать, где могут находиться месторождения полезных ископаемых, нужен устойчивый алгоритм. Этот алгоритм должен учитывать ключевые особенности и признаки месторождений, которые мы ищем. Для обучения алгоритма использовались только те карты и данные, на которых эти признаки проявлены (прямые признаки – месторождения, рудопроявления, точки минерализации, геохимические аномалии; косвенные признаки – геофизические аномалии, линеamentы, особенности рельефа и т.д.).

Для выявления этих ключевых особенностей в проекте *ArcGIS* были проанализированы все пространственные данные (геология, минерализация, геофизика, геохимия, скважины и т. д.), представленные в базе данных штата Южная Австралия на *South Australian Resources Information Gateway – SARG* (<https://map.sarig.sa.gov.au>).

Наш подход заключался в комплексном использовании геологического анализа и машинного обучения для прогнозирования участков локализации рудных месторождений.

<sup>1</sup> «Ваш метод использования набора разнообразных данных и моделей показывает хорошие корреляции с известными месторождениями и участками с высоким уровнем схожести. Хороший общий подход, баланс геологии и машинного обучения. Применение метода эвристики в картировании и линеamentах было интересным решением»

Основой отбора данных для машинного обучения и компьютерного прогнозирования является геологический анализ всех материалов в базе данных. База данных включает растры геологического, геохимического и геофизического содержания, космические снимки *Landsat*, *ASTER*, информацию о скважинах. Кроме того, были использованы данные из научных публикаций по известным австралийским рудным месторождениям.

С помощью машинного обучения прогнозировались участки выявления месторождений золота, меди, железа, урана, так как для обучения алгоритма по известным месторождениям этих металлов имелся достаточный объем данных. Кроме того, эти месторождения обладают рядом схожих геологических характеристик. Потенциальные месторождения полиметаллов не прогнозировались. Прогнозирование проводилось в двух масштабах – в региональном масштабе со скользящим окном 256 пикселей (20 x 20 км) и в локальном масштабе со скользящим окном 32 пикселя (2,4 x 2,4 км). Анализ проводился для всей территории штата Южная Австралия. Работа выполнялась в несколько этапов, последовательно рассмотренных ниже.

### **Геологический анализ входных данных и выбор карт для машинного обучения**

#### *Сбор информации по месторождениям*

Для анализа была использована геологическая база данных штата Южная Австралия, состоящая из множества информационных слоев, объединенных в группы – геология, геофизика, геохимия, данные бурения, гидрогеология, спектральные космоснимки, рельеф и т. д. База данных содержит 3828 записей о рудных месторождениях различных типов, которые также были нами проанализированы. Помимо этого, для изучения особенностей рудных месторождений Австралии было изучено 30 научных публикаций в журнале *Economic Geology* за 2009-2020 гг.

#### *Классификация месторождений*

В научных публикациях описано 8 основных типов гипогенных месторождений Австралии:

- *Iron Oxide Copper Gold (IOCG)-type (Olympic Dam, Prominent Hill, Moola);*
- *Orogenic Gold type (Ballarat East);*
- *Metamorphosed Sedimentary-Exhalative Pb-Zn type (Broken Hill);*
- *Sandstone-Hosted Uranium type (Beverley);*
- *Ni-Cu-PGE Sulfide type (Nebo-Babel);*
- *VMS type (Austin);*
- *Granulite-Hosted Gold type (Tropicana);*
- *Epithermal Gold type (Endeavour 41).*

Анализ базы данных Южной Австралии позволил нам выделить классы месторождений по металлам, которые мы использовали для машинного обучения. Исходя из того, что перечисленные в таблице типы месторождений имеют гидротермальный генезис (включая стратиформные месторождения) и многие общие характеристики метасоматических изменений, мы выделили 5 классов месторождений (рис. 1). Для обучения нейросети и выполнения прогноза использовались данные по известным месторождениям золота, меди, железа и урана.

#### *Определение главных особенностей классов месторождений*

Ключевые особенности месторождений являются важными для определения их поисковых признаков, отражающихся на геологических, геофизических и геохимических картах. Это:

- минеральный тип оруденения;

- метасоматоз – минеральные типы метасоматитов;
- морфология рудных тел – жилы, залежи, штокверки, минерализованные разломы и т. д.;
- структурный контроль рудной минерализации: рудоконтролирующие структуры разного масштаба и рудоносные структурные парагенезы;
- типы структурных ловушек;
- структурные тренды рудной минерализации – размеры, направление, кинематика;
- литологический, стратиграфический контроль рудной минерализации;
- геохимические аномалии;
- геофизические аномалии.

Рис. 1. Типы месторождений (Deposit types) Южной Австралии в базе данных и выделенные для машинного обучения классы месторождений (Deposit classes)

| Deposit types                                                              | Amount      | Deposit classes      |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------|
| <b>Fe</b>                                                                  | <b>129</b>  |                      |
| Deposits related to felsic porphyroaphanitic intrusions                    | 4           | Fe deposits (129)    |
| Deposits related to regionally metamorphosed rocks                         | 118         |                      |
| Fe skarn deposits                                                          | 7           |                      |
| <b>Au</b>                                                                  | <b>994</b>  |                      |
| Deposits related to felsic porphyroaphanitic intrusions                    | 95          | Au deposits (994)    |
| Deposits related to regionally metamorphosed rocks                         | 593         |                      |
| Deposits related to surficial processes and unconformities                 | 198         |                      |
| Polymetallic veins                                                         | 108         |                      |
| <b>Cu</b>                                                                  | <b>1377</b> |                      |
| Deposits related to felsic porphyroaphanitic intrusions                    | 136         | Cu deposits (1337)   |
| Deposits related to mafic and ultramafic intrusions in stable environments | 67          |                      |
| Deposits related to regionally metamorphosed rocks                         | 185         |                      |
| Deposits related to surficial processes and unconformities                 | 871         |                      |
| Cu-Fe skarn deposits                                                       | 4           |                      |
| Olympic Dam Cu-U-Au                                                        | 24          |                      |
| Polymetallic replacement deposits                                          | 26          |                      |
| Polymetallic veins                                                         | 37          |                      |
| Sediment-hosted Cu                                                         | 27          |                      |
| <b>Pb-Zn</b>                                                               | <b>267</b>  |                      |
| Deposits related to regionally metamorphosed rocks                         | 77          | Pb-Zn deposits (267) |
| Deposits related to surficial processes and unconformities                 | 149         |                      |
| Sandstone-hosted Pb-Zn                                                     | 3           |                      |
| Sedimentary exhalative Zn-Pb                                               | 15          |                      |
| Southeast Missouri Pb-Zn                                                   | 23          |                      |
| <b>U</b>                                                                   | <b>188</b>  |                      |
| Deposits related to felsic phanerocrystalline intrusive rocks              | 3           | U deposits (188)     |
| Deposits related to felsic porphyroaphanitic intrusions                    | 58          |                      |
| Deposits related to surficial processes and unconformities                 | 57          |                      |
| Sandstone U                                                                | 70          |                      |

### *Выбор карт, отражающих главные особенности месторождений*

По картам, представленным в базе данных, изучались структурно-геологические, геохимические, геофизические признаки и анализировались предпосылки обнаружения месторождений выделенных классов, проявленность прямых и косвенных признаков ми-



нерализации. После изучения месторождений, расположенных в нескольких кластерах (рис. 2), были выделены разномасштабные структурные тренды рудной минерализации и выполнена оценка пригодности и полезности тех или иных карт для машинного обучения и прогноза. Примеры анализа строения рудных узлов, рудных полей и месторождений с использованием различных материалов показаны на рис. 3.

Рассмотренные примеры минерализации разного типа и возраста в разных геологических провинциях позволили сделать следующие выводы:

- месторождения и проявления *Cu, Au, Fe, U, Pb-Zn* контролируются разломами разного направления, кинематики и возраста, а также структурными трендами (зоны трещиноватости, тектонической проницаемости);
- максимальная концентрация минерализации — в узлах пересечения разломов и структурных трендов минерализации;
- стратиграфический и литологический контроль минерализации имеет подчиненное значение или отсутствует;
- в магнитном поле и в поле силы тяжести рудная минерализация ассоциирует как с локальными максимумами (магнетит), так и минимумами (метасоматоз, демагнетизация, зоны разломов);
- на картах магнитных линеаментов выделяются 4 основных направления — *N-S, W-E, NW, NE*, с которыми связаны проявления и месторождения. Преобладают меридиональные рудоконтролирующие структуры;

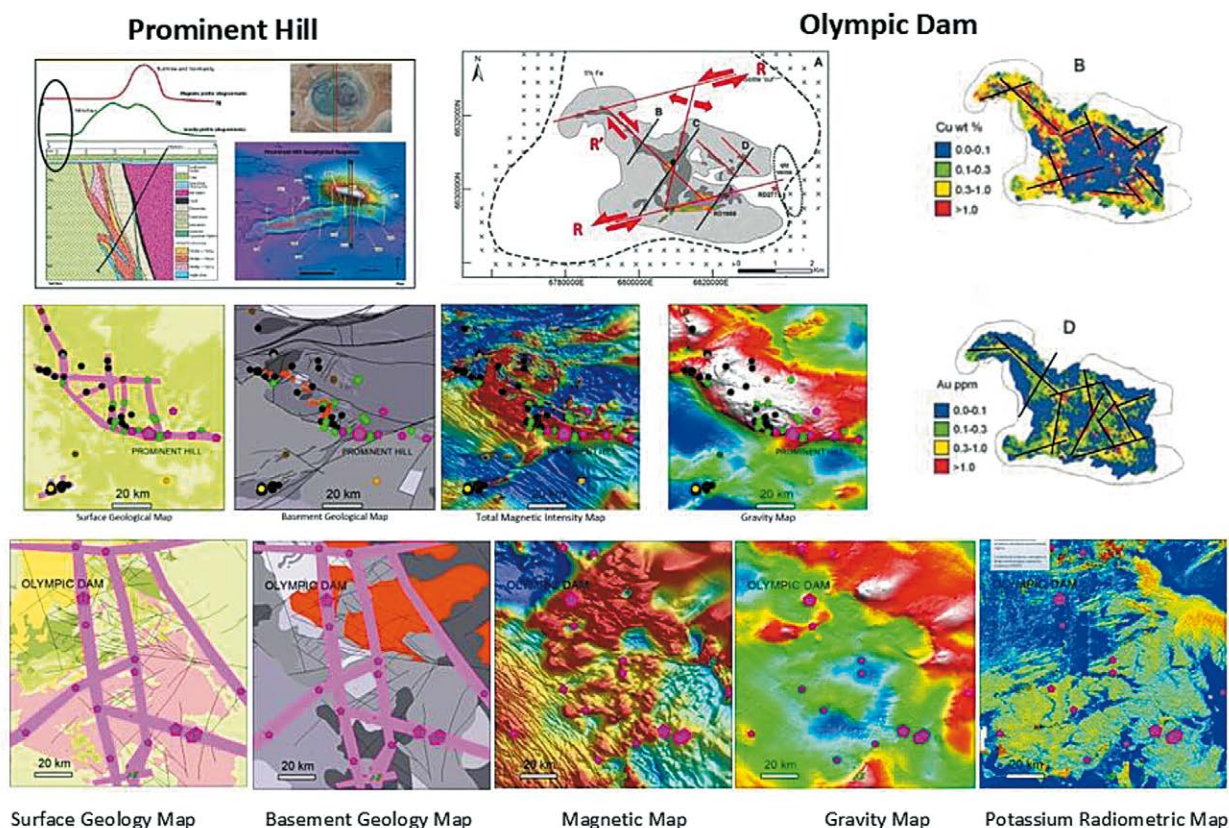


Рис. 2. Кластеры изученных месторождений штата Южная Австралия

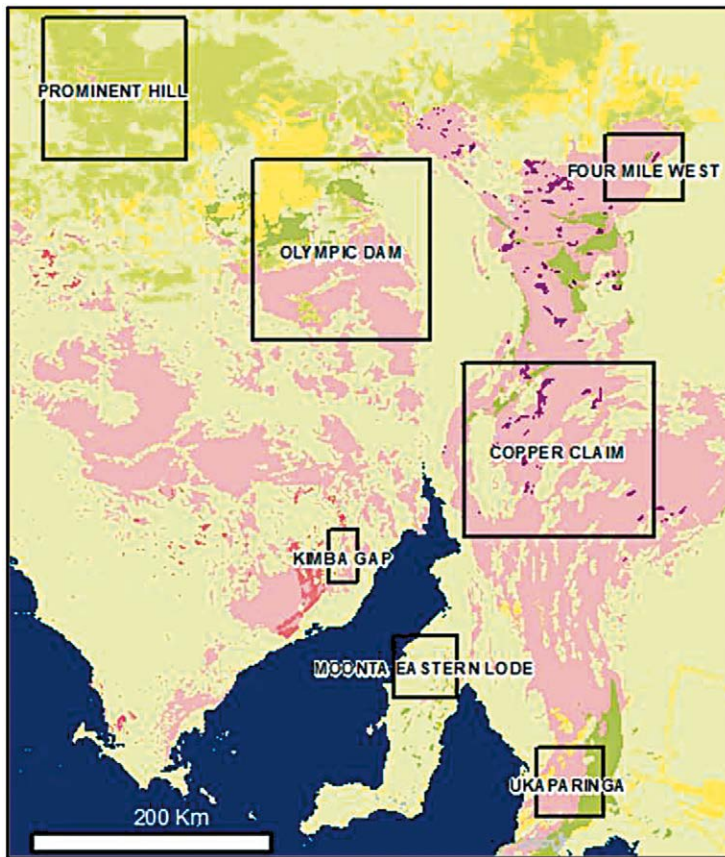


Рис. 3. Примеры анализа строения рудных узлов, полей и месторождений

- на картах радиогенного калия и урана месторождения могут как ассоциировать с локальными аномалиями положительного и отрицательного знака, так и не обнаруживать видимой связи с аномалиями;

- на карте радиогенного урана месторождения и проявления урана и урансодержащие месторождения меди отчетливо выделяются положительными аномалиями разной интенсивности. Эти аномалии часто линейные и отражают рудоконтролирующие разломы в фундаменте.

Рассмотренные особенности месторождений и рудопроявлений отражены косвенно на геологических и геофизических картах, которые были использованы нами для машинного обучения и прогноза месторождений: геологическая карта фундамента, геофизические карты аномального магнитного поля, поля силы тяжести, 1-й производной поля силы тяжести, карты концентрации  $U$ ,  $K$ ,  $Th$  (рис. 4).

Также для обучения алгоритма были подготовлены карты известных месторождений и рудопроявлений различных металлов ( $Cu$ ,  $Au$ ,  $Fe$ ,  $U$ ) и типов, сгруппированные по классам металлов. По опубликованным данным и, исходя из нашего опыта изучения рудных полей и месторождений, на средних и крупных месторождениях вышеперечисленных металлов площадь развития предрудных метасоматитов составляет не менее  $1 \text{ км}^2$ , поэтому все рудопроявления на картах каждого класса показаны черными кружками одинакового диаметра, соответствующего на местности диаметру 720 м.

Для оценки связи рудной минерализации с разломами и контактами геологических тел на карте общей интенсивности магнитного поля по градиентам и линейным аномалиям были выделены «геофизические» линеаменты. Для автоматизированного выделения линеаментов использовалась современная версия компьютерного приложения LESSA



(*Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis*), разработанного еще в Советском Союзе [1]. Было выделено множество коротких линеаментов-штрихов, сгруппированных по азимутам простираения. Штрихам-линеаментам одинакового направления был дан один цвет (рис. 5). Карта с цветовыми линеаментами была использована для обучения алгоритма, для учета влияния ориентировки рудоконтролирующих структур.

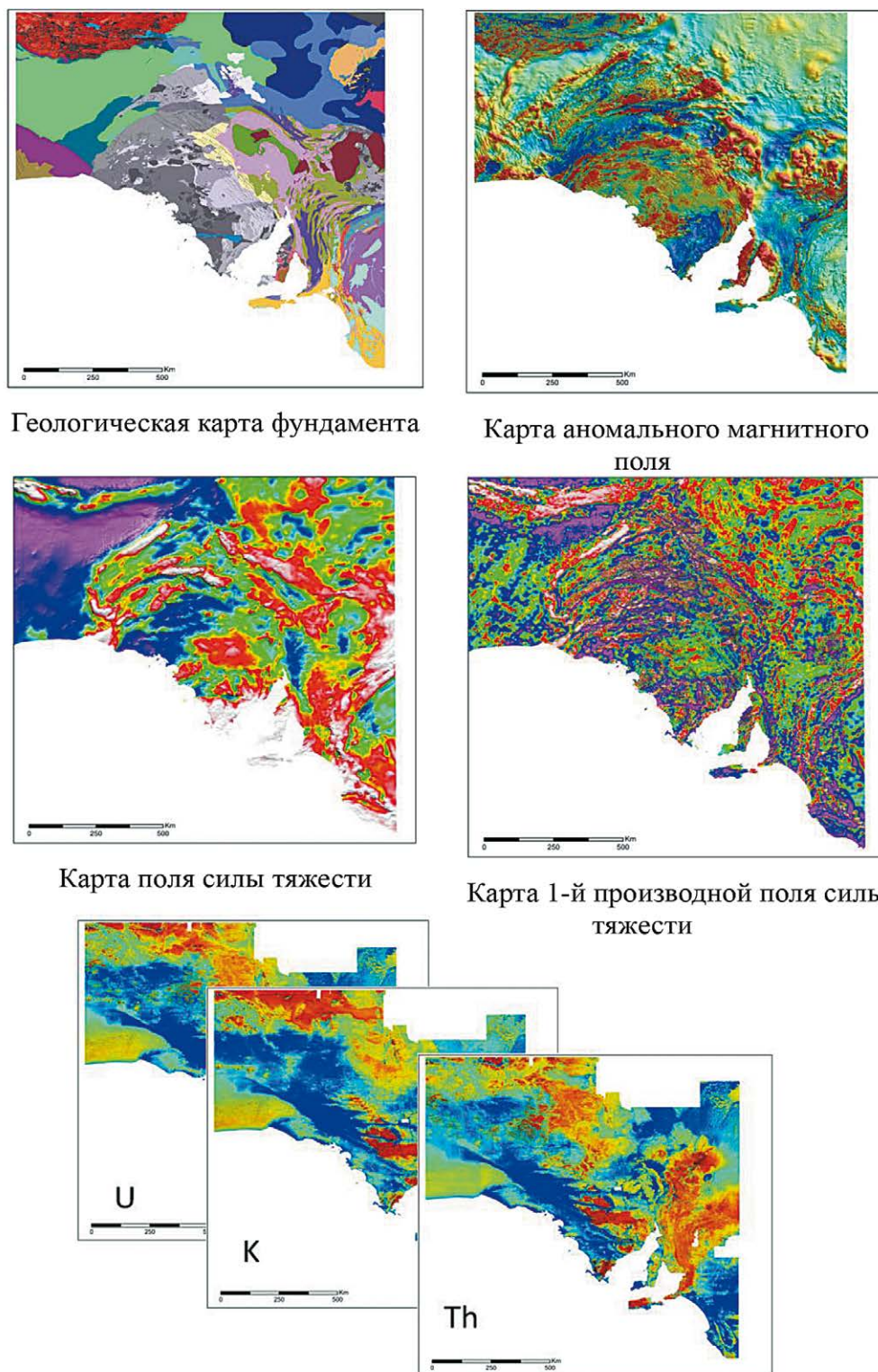


Рис. 4. Карты из базы данных, которые были использованы для машинного обучения

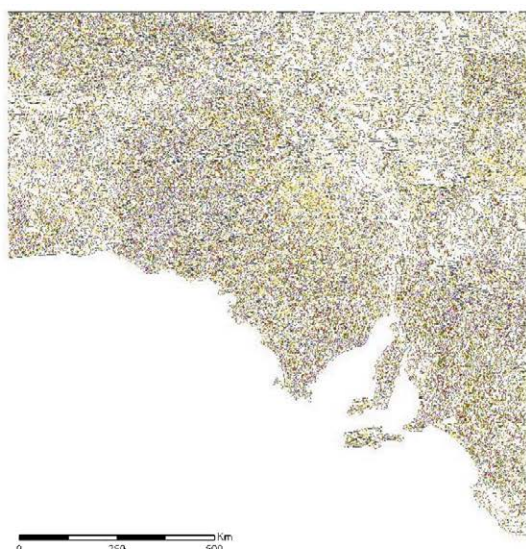
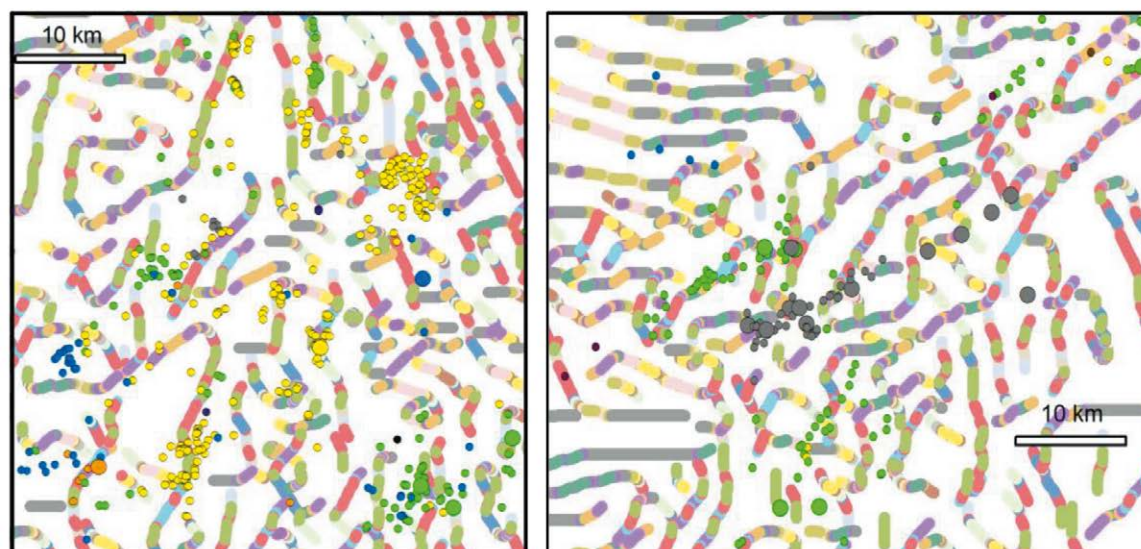


Рис. 5. Карта магнитных штрихов-линеаментов (слева) и фрагменты карты линеаментов, раскрашенных по направлениям (внизу)



Выбранные для обучения алгоритма карты представлены в виде цветных изображений высокого разрешения (23375 x 16542 *px*). Цвет каждого пикселя характеризует определенную геологическую или физическую характеристику пространства.

### Использование искусственного интеллекта

#### Выбор подходящего алгоритма ИИ

В процессе развития технологий было разработано множество методов для автоматизации различных процессов. Среди прочих разработок были созданы методы для автоматизации определения предполагаемых мест нахождения месторождений. В том числе были разработаны различные решения для экспресс-оценки территории на предмет вероятности выявления тех или иных полезных ископаемых с использованием искусственных нейронных сетей. Так как любая задача, связанная с машинным обучением в применении к анализу изображений, требует извлечения векторов-характеристик изображения для дальнейшего анализа, был проведён поиск подходящего для этой цели алгоритма.

За основу решения задачи была взята докторская диссертация Джастина Гранека «Применение алгоритмов машинного обучения к задаче картирования полезных ис-

копаемых» [3]. В работе представлена методология прогноза нахождения различного рода месторождений при использовании информации с геологических и геофизических карт. Методика предсказания, а точнее расчёта, основана на использовании небольших участков комплекта карт размером 10 x 10 км. Наиболее подходящим алгоритмом являются свёрточные нейронные сети (СНС). Они основаны на использовании свёрток – математических операторов, которые обычно применяются для фильтрации различного рода сигналов. СНС относятся к алгоритмам машинного обучения с учителем (для их настройки требуется большое количество данных с известным результатом (классом или числом)). Как и все алгоритмы, СНС основаны на статистике и линейной алгебре. СНС состоят из множества слоёв – свёрток. После свёртки изображение (которое представлено в виде трёхмерной матрицы) «сжимается» за счёт того, что оператор свёртки в процессе проведения математических операций превращает сворачиваемый регион в одно число.

В архитектуру СНС входят множество слоёв (до десятков тысяч) подобного рода, а также другие слои, например, слои нормализации, зануления отдельных пикселей в процессе обучения и многие другие. Каждый слой представляет собой матрицу, которая содержит в себе веса – числа, на которые домножается изображение, чтобы получить конечный результат. СНС могут быть использованы как для задач классификации, так и для задач регрессии (предсказания определённого числа). В случае решения задачи классификации часто используется оператор *softmax*<sup>1</sup>, который преобразует результаты предсказания в вероятность принадлежности изображения к каждому классу.

#### *Машинное обучение по картам, валидация*

Процесс обучения СНС состоит из нескольких этапов:

- 1) на вход подаётся изображение (чаще всего в сериях по 50-100 изображений);
- 2) на выходе из сети выдаётся результат предсказания;
- 3) результат сравнивается с истинным значением (классом или числом);
- 4) считается величина ошибки между предсказанием и истинным значением (функция потери).

Основываясь на функции потери и шаге обучения, методом обратного распространения ошибки веса сети изменяются таким образом, чтобы быть ближе к правильному ответу. Таким образом, СНС обучает все фильтры внутри себя (которые изначально инициализированы случайными весами) извлекать такую информацию из изображения, которая позволит ей получать правильные предсказания с точки зрения сравнения предсказания и истинного результата.

По результатам обучения модель может применяться на любых данных, схожих по природе с теми, что подавались в процессе обучения. Для того, чтобы избежать переобучения или недообучения алгоритма, применялись стандартные процедуры. Для проверки работоспособности алгоритма использовались различные метрики качества. В нашем случае использовалась метрика «точность предсказания».

Для обучения алгоритма представленные карты были разбиты на участки одинакового размера 256 x 256 пикселей (соответствующие на местности участкам ~ 22 x 22 км). Из них были отобраны площади с известными месторождениями и рудопроявлениями. В результате было получено 447 изображений для класса «месторождение». Аналогич-

<sup>1</sup> Многопеременная логистическая функция применяется в машинном обучении для задач классификации, когда количество возможных классов больше двух. Часто используется для последнего слоя глубоких нейронных сетей для задач классификации



ное число изображений было случайным образом отобрано из оставшихся изображений для класса «без месторождений». Таким образом, финальный размер базы данных для обучения составил 894 изображения.

В качестве архитектуры СНС была выбрана архитектура *AlexNet*; это достаточно небольшая архитектура, что уменьшает вероятность переобучения. Для обучения сети были использованы отложенная выборка и аугментация изображений. Отложенная выборка сформирована из 30% данных (268 изображений из двух классов). Обучение происходило на протяжении 100 эпох с сохранением результатов в случае высоких показателей метрики точности на отложенной выборке и изменением шага обучения в случае выхода на плато в точности предсказания. Схема процесса обучения нейросети показана на рис. 6.

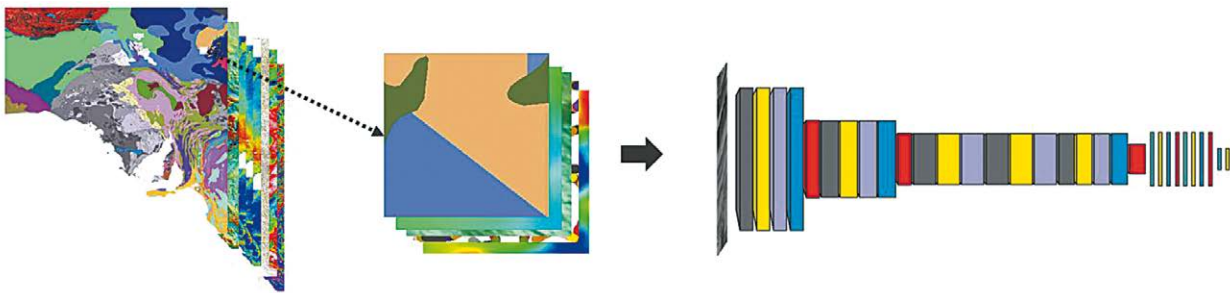


Рис. 6. Схема процесса обучения нейросети

В процессе обучения был достигнут результат в 80% точности на отложенной выборке и 78% на тестовой, что говорит о том, что СНС не успела переобучиться и при этом хорошо обобщила данные. Обученный алгоритм был применён на всю площадь штата Южная Австралия.

#### *Машинный прогноз*

В результате работы алгоритма были составлены карты регионального прогноза для четырёх классов (*Au*, *Cu*, *Fe*, *U*) месторождений (рис. 7). Для сравнения результатов регионального и локального прогнозов использовались сводные карты для всех указанных классов месторождений.

#### **Геологическая экспертиза результатов машинного прогноза**

Построенные нейросетью карты прогноза анализировались геологом-экспертом. Основные выводы перечислены ниже.

В региональном масштабе прогнозные площади с высокой вероятностью обнаружения месторождения заданного класса включают известные месторождения и проявления, а также примыкающие к ним области или отдельные области без выявленной минерализации (рис. 8).

Области высокой вероятности имеют линейно-узловое распределение, отражая региональный структурный план рудоконтролирующих разломов и зон тектонической проницаемости.

Отмечается зональное строение крупных областей вероятностей — выделяется центральная часть более высокой вероятности и периферийная зона более низкой вероятности.

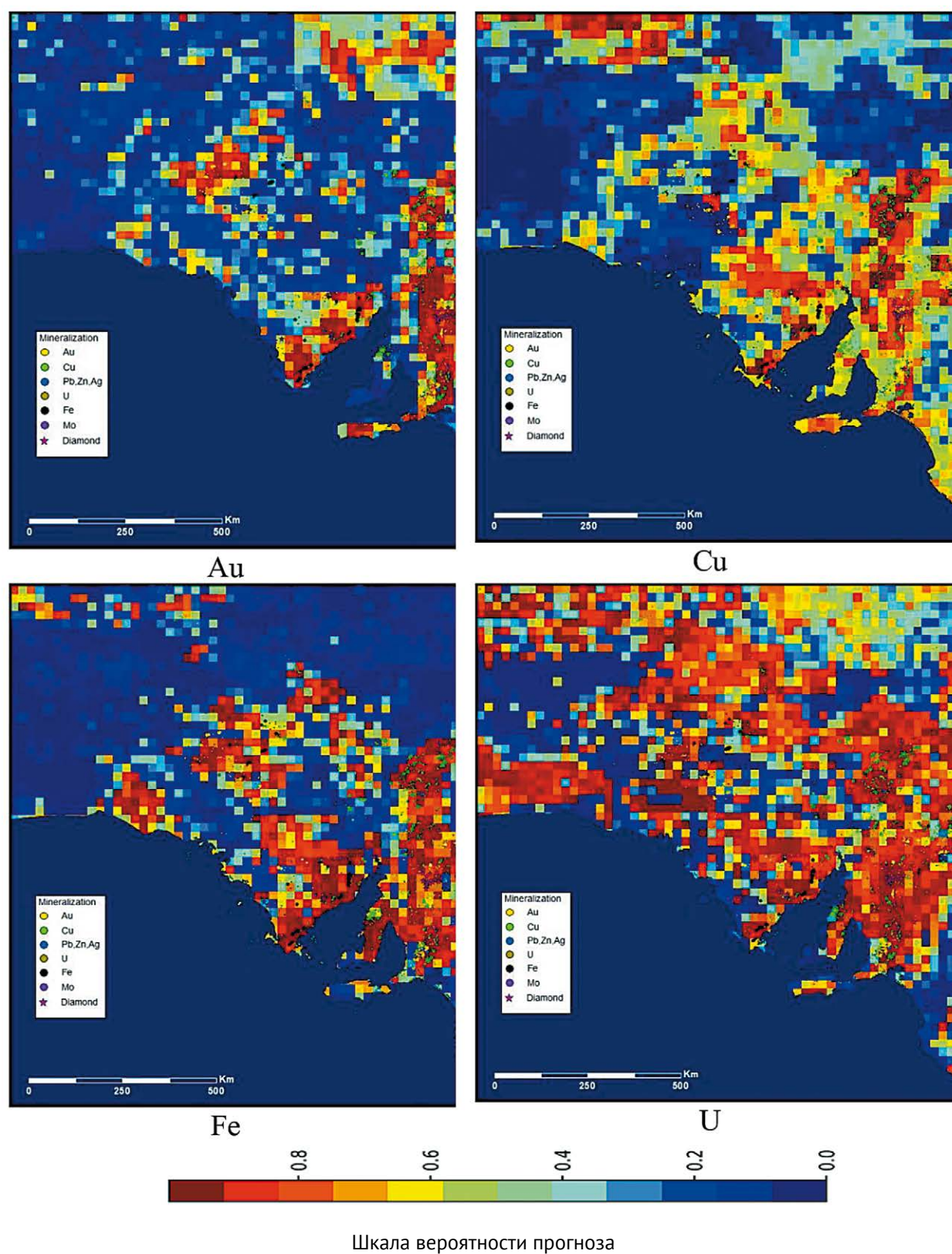


Рис. 7. Карты регионального прогноза по классам месторождений. Кругами показаны известные месторождения и рудопроявления

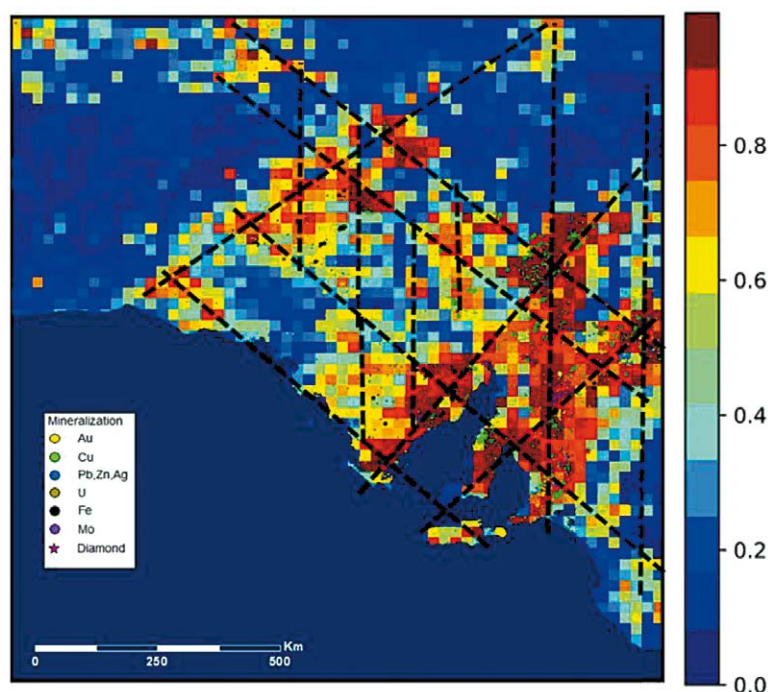


Рис. 8. Линейно-узловое распределение областей высокой вероятности прогноза на карте регионального прогноза (суммарно для *Au*, *Cu*, *Fe*, *U*).

Черным пунктиром показаны структурные тренды

Преобладает меридиональная ориентировка линейных прогнозных площадей, что соответствует преобладанию меридиональных рудоконтролирующих структур (трендов минерализации).

В локальном масштабе для месторождений всех классов области высокой вероятности также включают большинство известных месторождений и проявлений, выходя за пределы их распространения, указывая на перспективные участки поисков новых месторождений (рис. 9).

Области высокой вероятности образуют тренды и кулисные зоны, которые можно интерпретировать как зоны растяжения, связанные с региональными сдвигами.

Отмечаются несовпадения областей высокой вероятности на картах регионального и локального прогноза. Возможно, это обусловлено тем, что при обучении сети для локального прогноза не использовалась карта магнитных линеаментов; возможны также и другие причины.

#### *Сравнение результатов машинного прогноза с прогнозом геолога-эксперта*

Для кластера *Prominent Hill* было выполнено сравнение результатов регионального машинного прогноза с более ранним экспертным прогнозом, который выполнил А.Ф. Читалин при участии в конкурсе по прогнозу месторождений типа *IOCG* на лицензионной площади *Mount Woods* (Chitalin A.F. Prediction *IOCG* deposits at *Mount Woods*, 2019). При экспертном прогнозировании использовалась та же база данных, что и для машинного прогноза. На рис. 10 видно, что сходимость прогнозов довольно высокая — с выделенной «вручную» перспективной площадью (голубой эллипс) совпали области средней-высокой вероятности обнаружения месторождений по результатам машинного прогноза.

#### **Геологическое таргетирование — выбор перспективных поисковых объектов**

Выделенные перспективные участки с высокой вероятностью прогноза (>70%) открытия месторождений ранжировались по степени изученности бурением. На карты прогно-



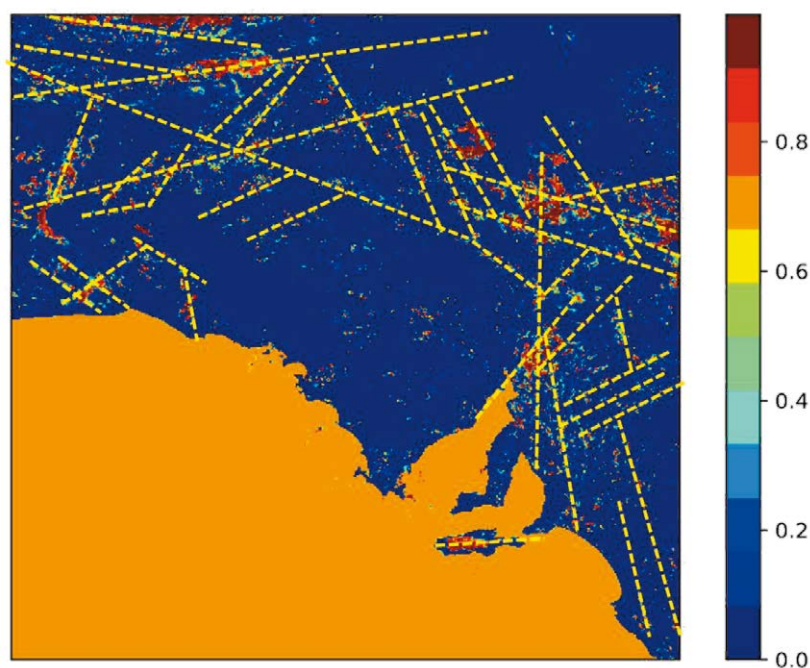


Рис. 9. Линейно-узловое распределения областей высокой вероятности прогноза на карте локального прогноза (суммарно для *Au*, *Cu*, *Fe*, *U*).

Желтым пунктиром показаны структурные тренды

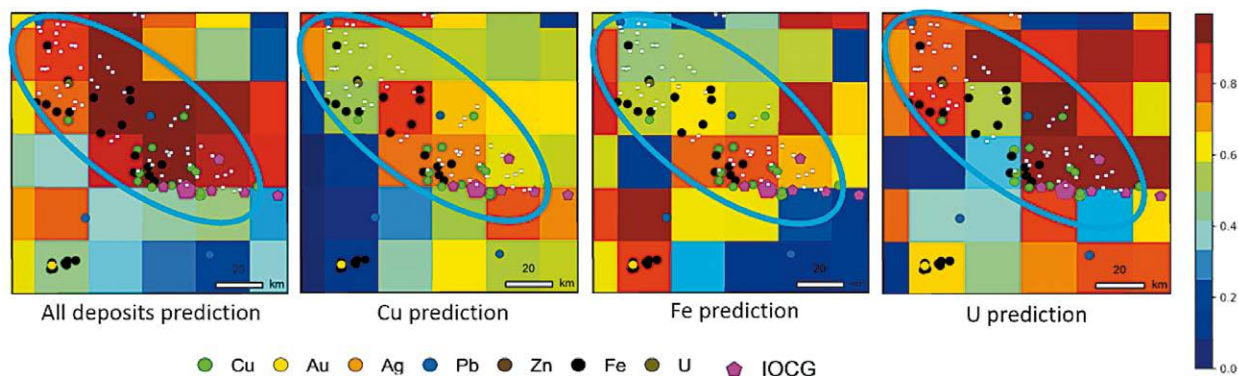


Рис. 10. Сравнение площадей экспертного «ручного» прогноза (голубой эллипс) и машинного прогноза. Белые квадратики – рекомендованные поисковые скважины при «ручном» прогнозе

за были наложены точки скважин из базы данных (125 752 поисковых и разведочных скважины на *Cu*, *Au*, *Ag*, *Pb*, *Zn*, *Fe*, *U*, алмазы). К таргетам (наиболее перспективным поисковым участкам) мы отнесли участки с высокой вероятностью прогноза (>70%), но слабо изученные бурением (рис. 11). К таргетам 1-й очереди были отнесены участки с очень высокой вероятностью прогноза (>90%). Они включают известные месторождения и кластеры рудопоявления или к ним примыкают. К таргетам 2-й очереди были отнесены обособленные прогнозируемые участки, но без выявленной минерализации и с большой мощностью (>1000 м) мезокайнозойского чехла.

### Заключение

Описанный метод машинного прогноза месторождений – один из предлагаемых и практикуемых сейчас несколькими десятками компаний в мире. Наша методика пока-

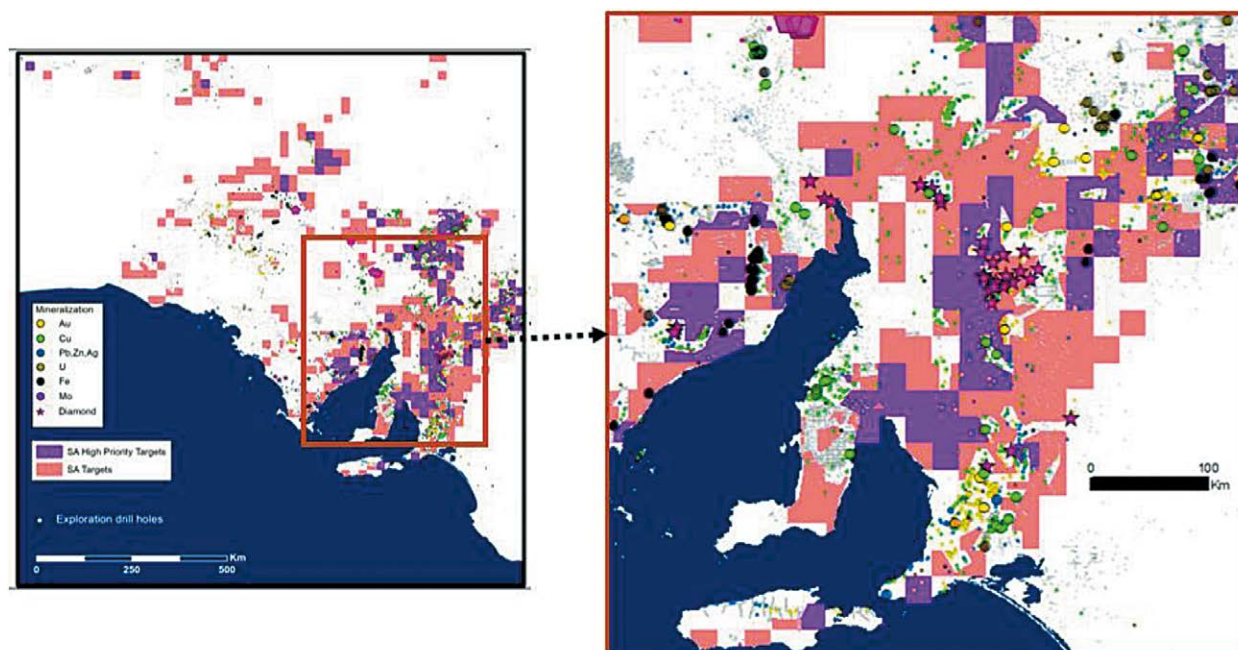


Рис. 11. Карта таргетирования для Южной Австралии. Таргеты высокого приоритета показаны сиреневым цветом. Серые точки — скважины

зала свою эффективность. Следует подчеркнуть, что наличие качественной базы данных с разнообразными и верифицированными данными является необходимым условием для анализа, выбора данных и обучения нейросетей. Обязательна комбинация данных, полученных с помощью различных методов. Основой эффективного прогноза является предварительный геологический экспертный анализ при выборе и подготовке данных для машинного обучения, корректировке в процессе работы и для оценки результатов работы искусственного интеллекта (ИИ). Эту работу должны выполнять только опытные геологи-эксперты. ИИ очень быстро развивается, и нельзя игнорировать его возможности обработки значительных массивов мультимодальной информации. Но волшебной палочки нет — ИИ в поисковой геологии пока только перспективный инструмент, который необходимо учить и контролировать на каждом этапе. Критическая ошибка для всего процесса выполнения прогноза — когда во главе решения задачи стоят не геологи, а программисты или управленцы.

#### **Программный комплекс ИГТ *GeoTarget***

ООО «ИГТ-сервис» постепенно развивает тему цифрового геологического таргетирования и прогноза распространения зон рудной минерализации. За основу была взята апробированная нами в Австралии методика прогноза с помощью ИИ, описанная выше. Разрабатываемый нашими специалистами программный комплекс *GeoTarget* состоит из 8 базовых модулей (рис. 12): 4 разработанных модуля зарегистрированы в Росреестре и тестируются: *Gnome Assist* (модуль векторизации); *GeoLog Assist* (модуль документации и верификации первичных данных); *GT Lineament+* (модуль линейamentного анализа космоснимков, БПЛА ортофотопланов и геофизических карт); *SOVA* (модуль мультиспектрального анализа); 4 модуля находятся в разработке.

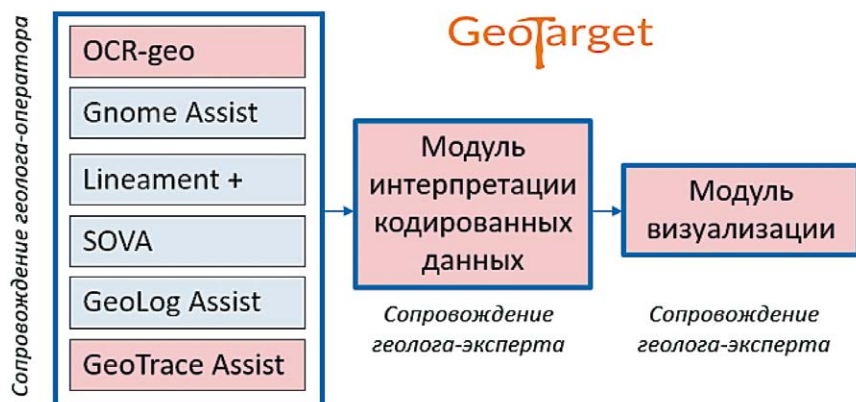


Рис. 12. Программный комплекс ИГТ GeoTarget

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Златопольский А.А., Малкин Б.В. Автоматизированный анализ ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (программа "Lessa") // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2005. – Вып. 2. – Т. 2. – С. 188-195.
- 2) Chitalin A.F., Baraboshkin E.E., Sivkov D.V. et al. Geological Analysis and Machine Learning for deposits prediction. Report prepared for Explore SA The Gawler Challenge, 2020. – 40 p.
- 3) Granek, J. (2016). Application of Machine Learning Algorithms to Mineral Prospectivity Mapping. University of British Columbia. <https://doi.org/10.14288/1.0340340>.

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ РАБОТЫ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ТАРГЕТИРОВАНИЕ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВ ОРУДЕНЕНИЯ ВИТВАТЕРСРАНДСКОГО ТИПА НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Шац А.Л., Кара Т.В., Янюшин А.М.  
ООО «Золото Анабара», Москва  
geology@anabargold.ru

*Цель работ* – раскрытие металлогенического потенциала Анабарского щита и прилегающих территорий: крупнейшего «белого пятна» на геохимической карте России, сохраняющего перспективу открытия крупных и уникальных месторождений в масштабе новой золоторудно-россыпной провинции.

### **Актуальность проблемы**

Согласно публикациям научно-технического журнала «Руды и металлы», издаваемого ФГБУ «ЦНИГРИ», по прогнозу минерально-сырьевая обеспеченность добычи золота в России до 2070 года составляет не более 30 лет. Авторы рассматривают прогноз добычи твёрдых полезных ископаемых, базирующийся на интеграции ожидаемых сроков эксплуатации разрабатываемых и осваиваемых месторождений. Ввод в строй добывающих предприятий на осваиваемых золоторудных объектах в ближайшие годы может обеспечить рост добычи ежегодно почти на 5%. Снижение добычи на крупных месторождениях, таких, как Воронцовское, Купол и Двойное, в связи с исчерпанием запасов должно быть компенсировано выходом на проектную мощность ГОКов Наталкинский и Гросс, а также вводом в эксплуатацию месторождений Нежданинское, Эльгинское, Наседкино, Бараньевское и Клён. Планируется запуск крупных предприятий на месторождениях Кекура, Высокое, Тасеевское, Чёртово Корыто и др., с 2026 года планируется начало разработки уникального по масштабу месторождения Сухой Лог. Кроме этого, заметный вклад в добычу золота обещает внести начало эксплуатации крупных медно-порфировых месторождений, таких, как Малмыжское, позднее – чукотской Песчанки. Прирост количества добываемого драгоценного металла только на указанных объектах может составить до 100 тонн, а по России в целом добыча золота может достичь 450-500 тонн в год.

Однако к началу 30-х годов, когда ожидается прекращение эксплуатации Олимпиадинского месторождения, важнейшего на сегодняшний день разрабатываемого объекта, тенденция может измениться. Полностью компенсировать выбывание этого месторождения вводом Сухого Лога не удастся, так как добыча на нём проектируется в меньшем объёме. Естественное истощение других разрабатываемых месторождений может обусловить дальнейшее падение добычи золота [2].

Существенный спад добычи золота может произойти в 2032–2036 годах, когда прогнозируется завершение отработки месторождений Благодатное, Павлик, Гросс и Майское, и в 2051–2052 годах в связи с исчерпанием запасов месторождений Наталкинского, Быстринское и Малмыжское. Из крупных к этому времени в эксплуатации могут остаться только Сухой Лог, Вернинское, Нежданинское, Майское и Песчанка, которые обеспечат лишь около 80 тонн золота в год (рис. 1).

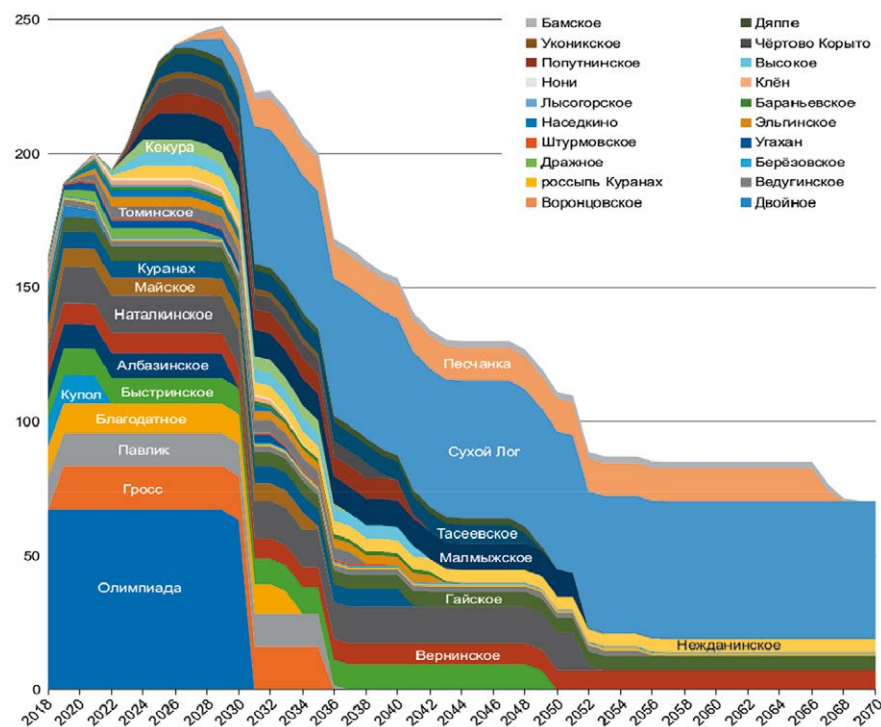


Рис. 1. Прогноз добычи золота в России до 2070 г. («Руды и металлы», № 4, 2021 г.)

Реализация такого сценария может существенно ослабить позицию России как ведущего мирового производителя золота. Безусловно, полностью он реализован не будет, поскольку геологоразведочные работы на золото продолжаются как на действующих объектах, так и на новых территориях, причем довольно активно и результативно. Тем не менее, перспективы спада добычи после завершения эксплуатации Олимпиадинского месторождения вполне реальны. Очевидно, что резкая интенсификация геологоразведочных работ, направленных на наращивание сырьевой базы, может сгладить негативный эффект её истощения. При этом снижения добычи на определённый период избежать, скорее всего, не удастся, учитывая длительность геологоразведочного процесса от открытия нового скопления полезного ископаемого до ввода месторождения в эксплуатацию.

Авторы подчеркивают, что результаты анализа обеспеченности существенно зависят от того, каким образом подсчитываются запасы полезного компонента. Во многих рассмотренных случаях анализ базируется на информации, содержащейся в государственном балансе запасов полезных ископаемых. Обеспеченность сырьём, показанная на графиках, — максимально возможная на сегодняшний день. При этом хорошо известно, что эксплуатационные запасы, рассматриваемые недропользователем в качестве реально извлекаемых, часто оказываются меньше учитываемых госбалансом, иногда существенно [2].

Как мы видим, даже ввод в эксплуатацию месторождения Сухой лог, единичного крупного уникального объекта, не спасает ситуацию в долгосрочной перспективе. Систематические работы по геологическому изучению рано или поздно приводят к открытию новых золоторудных месторождений и провинций, но при нынешних темпах исследований существуют риски, что этот прирост не опередит истощение запасов и не компенсирует снижение их качества.



## Перспективы Северо-Востока Сибирской платформы

Сибирская платформа занимает обширную территорию в Восточной Сибири — от Енисея на западе до Лены на востоке. С севера она ограничена складчатой системой Таймыра, с востока — Верхояно-Чукотской складчатостью, с юго-востока — Монголо-Охотским складчатым поясом, с юго-запада и юга — Енисейским Кряжем, Восточным Саяном и Байкало-Витимской складчатой областью. Нижний ярус — архейско-раннепротерозойский фундамент, верхний — платформенный чехол от рифея до фанерозоя. Метаморфизованные породы фундамента выходят на поверхность на территории Анабарского щита и Оленёкского поднятия в северной части и Алдано-Станового щита в юго-восточной части и отдельных выступах.



История открытия золоторудных месторождений и освоения новых провинций является собой череду случайностей и закономерностей. Регион привлекает внимание исследователей, накапливаются данные, их количество переходит в качество. Кажущееся случайным открытие первого объекта часто влечет за собой понимание специфики территории и последующие открытия в регионе. Начиная с XVIII века, новые регионы и новые типы месторождений вовлекались в поиски и разработку:

- 1745-1814 гг. — коренные и россыпные месторождения Урала;
- 1840-1928 гг. — россыпи Верхне-Ленского района, Витима и Алдана;
- 1916-1940 гг. — месторождения Колымы;
- 1950-1960 гг. — Чукотская золотоносная провинция.

В XXI веке настало время северо-востока Сибирской платформы и Анабара.

В 30-х гг. на Колыме решалась линейная задача — поиски россыпей, в том числе погребенных или перекрытых, велись по речным долинам; основным методом исследования было шлиховое опробование с несложной аналитикой.

В 50-х гг. на Чукотке поисковая задача стала двумерной — выявление ловушек для россыпей с привлечением методов структурной геологии (пересечения разломов, формировавших природные барьеры, на которых накапливается металл), изучение источников сноса и выход на коренные объекты.

Для северо-востока Сибирской платформы задача становится трёхмерной и должна решаться в объеме глубин экономически целесообразного извлечения запасов твердых полезных ископаемых современными геологическими методами изучения структуры и вещества. В случае выходов промышленного оруденения на поверхность оно закономерно было бы обнаружено ранее систематическими поисковыми работами предшественников.

Для периферии Алданского щита при составлении прогнозно-минерагенической карты Южной Якутии работами ФГБУ «ВСЕГЕИ» [6] выделяется Алдано-Вилуйская рудно-россыпная золотоносная провинция с суммарными ресурсами свыше 5000 тонн золота.

Перспективы периферии Анабарского щита, не имеющего пока промышленных месторождений, хоть и более отдаленные, но не менее масштабные. Анабарский щит в силу относительно слабой металлогенической изученности остается примером одного из многих древних архейских щитов, для которого пока не выявлены золоторудные объекты.

### **История изучения и изученность территории**

К работам по золоту Прианабарья исследователи регулярно возвращались с 60-х годов XX века, о чем свидетельствуют работы Научно-исследовательского института геологии Арктики (НИИГА), треста «Якуталмаз», АК «АЛРОСА». Однако до сих пор на значительной территории (15 спаренных листов ГГК-200) самыми современными материалами является геологическая съемка ГГК-200 I-го поколения, для которой отсутствует геохимическая основа (рис. 3). Не проведено опробование потоков и почв, отсутствует систематический отбор шлиховых и коренных проб. Это «белое пятно» находится в пределах перспективной территории — по результатам тематических работ и работ по попутному извлечению при добыче россыпных алмазов золота и металлов платиновой группы. Фондовые материалы, как правило, не оцифрованы, представлены в бумажном виде и потому не могут быть проанализированы современными методами в силу отсутствия цифровой основы данных, малой точности определения координат и устаревших аналитических методов. В регионе на отдельных листах проводятся современные работы по программе ГДП-200 и ГХО-200, но при нынешних темпах они займут не менее 25-30 лет.

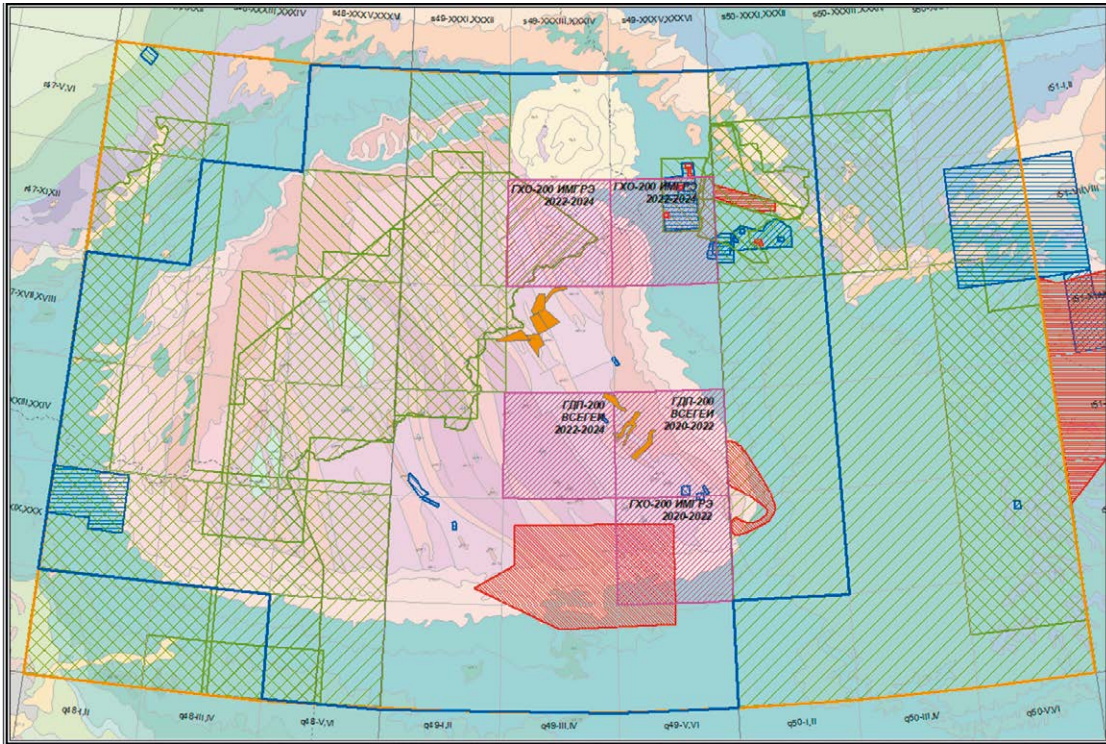


Рис. 3. Схема геохимической изученности Анабарского щита (по данным ВСЕГЕИ и ФГБУ «Росгеолфонд»)

Кроме того, полностью отсутствует следующая стадия поисковых работ 50-тысячного масштаба, на которую приходятся основные открытия месторождений.

Территория максимального интереса – северо-восточная окраина Анабарского щита. Однако целесообразно провести опережающие работы по выявлению перспектив золоторудных объектов по всей периферии массива. Разрозненные результаты лоскутного металлометрического опробования разных лет имеют устаревшую аналитику и не дают общей картины. Возможно существенное ускорение и удешевление работ с помощью применения современных методов ДЗЗ, детальной спектральной спутниковой съемки и БПЛА.

Территория находится вблизи зон потенциального интереса крупных горнодобывающих компаний: «Норильский Никель», «Полус Золото» и «Алроса». ООО «Алмазы Анабара» ведет успешную добычу россыпных алмазов с попутным извлечением золота и металлов платиновой группы из россыпей. На протяжении последних 9 лет по опубликованным данным добыча выросла с 83,5 кг  $Au$  в 2017 г. до 190,3 кг  $Au$  + 6,6 кг платины к 2022 г. В январе 2024 года поставлены на баланс первые запасы россыпного золота на территории Анабарского щита: 786,6 кг  $Au$  на участках Бороску-Унгуохтах и Хаптасынах-2 Оленекского улуса Республики Саха (Якутия).

### **Возможные типы оруденения**

В разное время исследователями предполагались различные возможные типы оруденения для данной территории.

Витватерсрандский тип – «золотоносных псевдоконгломератов» – минеральная ассоциация, характерная для рифтогенных структур: самородное золото плюс минералы платиновой группы плюс урановая минерализация и кластогенные алмазы – сходство с ассоциацией Витватерсранда. Сходство морфологии и гранулометрического состава частиц золота [1, 4, 7].

Карлинский тип – крупные метасоматические тела в карбонатных вмещающих породах, содержащие субмикроскопическое тонкодисперсное золото во вкрапленном пирите или марказите. Распространены в областях, подстилаемых архейскими породами кристаллического фундамента, формируют крупные месторождения [5].

Медно-порфировый тип – выделяется золотоураноносная Билляхская зона с перспективами золотоносности молибден-порфирового типа и геохимически значимыми содержаниями платины [16].

Наиболее разработанным и перспективным в разрезе имеющихся данных видится витватерсрандский тип золотоносных псевдоконгломератов, особенно в свете современной магматогенной теории генезиса золотоносности Витватерсранда [1, 7].

#### **Металлоносные конгломераты – источники россыпей**

Проводятся масштабные работы по выявлению перспектив развития минерально-сырьевой базы арктической зоны, включая север Якутии и Красноярского края. Формирование конгломератовых толщ Анабарского щита в средне-позднерифейское время на этапе становления древнего осадочного чехла на фоне заложения континентальных рифтов и развития базитового магматизма.

Протяженность подобных толщ от первых до 10-12 км при мощностях 40-240 м. Рудоносность рифейских конгломератов Анабара малоизучена, хотя в бассейне р. Анабар широко распространены алмазы, самородное золото и платиноиды. Конгломераты рифея могут служить источниками золота и платины в россыпях (рис. 4) [9].

#### **Тектономагматические и структурные критерии**

Сходство строения Сибирской и Южно-Африканской платформ, отмеченное еще в конце XIX века, приведшее в свое время к открытию якутской алмазоносной провинции, возможно, этим не исчерпано. Однако на Сибирской платформе аналогичные золотоносные конгломераты до настоящего времени не вскрыты, так как перспективные для их нахождения площади погребены под толщей фанерозойских и рифейских образований на глубине 300-500м [3]. Территории Сибирской и Южно-Африканской платформ харак-

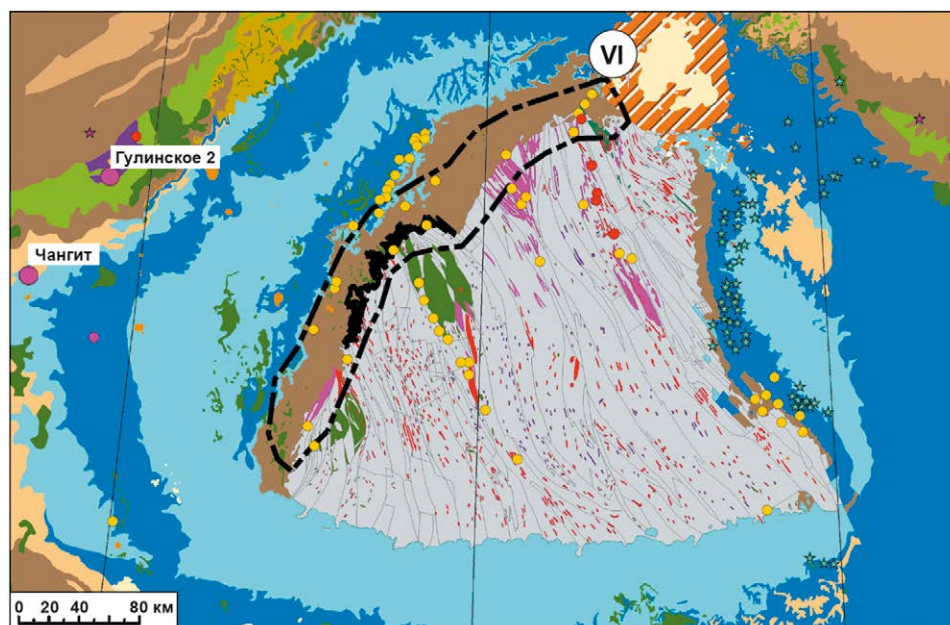


Рис. 4. Схема распространения конгломератовых толщ, проявлений золота, редкоземельных элементов и урана в Анабарском регионе (Волков А.В. и др., 2021)



теризуются сходной геологической эволюцией, массивы располагаются в центральных частях субмеридиональных Анабаро-Алданского и Южно-Африканского кратонов, которые рассечены подвижными поясами – Вилуйским и Трансваальским рифтами с многократными излияниями эффузивных и интрузивных траппов. Имеются морфологически сходные выступы фундамента – Сунтарский и Якутский в Вилуйском поясе, Вендефортский и Эвандер в Трансваальском. Присутствуют ранне- и древнеархейские зеленокаменные пояса (рис. 5).

Также наличествуют сходные по строению палеорифты или шовные зоны между двумя жесткими платформенными плитами консолидированных складчатых областей или кратонов (Билляхская зона, сформированная в результате коллизии Далдынского и Халчанского террейнов Анабарского щита). Пририфтовые впадины, прогибы, мульды заполнены толщами вулканогенно-терригенных осадков, сформировавшихся на кристаллическом фундаменте на этапе растяжения (Уджинский авлакоген, разделяющий Анабарский щит и Оленекское поднятие). Наблюдается коллизионный этап развития мульды: смятие осадочных толщ в складки с образованием чешуйчатых надвигов и внедрением в конце этапа ультрабазит-базитовых или даже кислых интрузий [8].

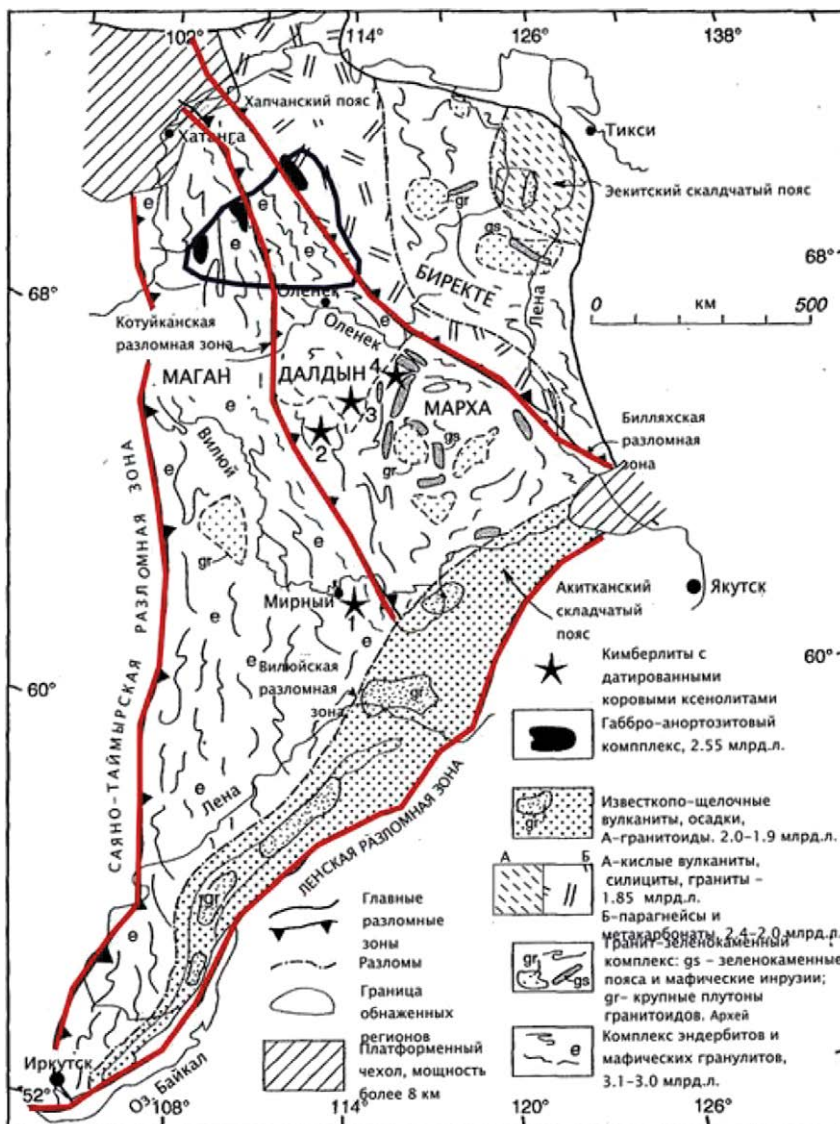


Рис. 5. Структурная схема Анабарского щита и его окружения (Розен, 2003)

Этапы тектономагматической активизации в условиях сжатия рифта с проявлением контрастного щелочного магматизма, становления крупного гранитного батолита, отвечающего по площади впадине с трансформацией вмещающих пород в зоне экзоконтакта, обуславливающим золото-уран-редкометальное оруденение (выходы на дневную поверхность отсутствуют, однако по геофизическим данным возможно его наличие на глубине).

Оруденение золотокварцевой, золото-сульфидно-кварцевой, золото-ураново-сульфидной формаций, связанное со штокверковым, жильным или прожилково-вкрапленным распределением рудного вещества. Источники золота могут локализоваться в метаморфических породах архея и терригенных протерозоя, гранитоидах и песчаниках. Региональное распространение совместно с золотом платиноидов: иридистая платина, рутениевый иридий, иридистый осмий [12, 14, 15].

Изучены урановорудные образования Анабара, рудоконтролирующие зоны древних структурных стратиграфических несогласий дорифейско-предвендского возраста. Выделяется золотоураноносная Билляхская зона, выявлены геохимически значимые содержания платины. Карта золотоносности северной части Анабаро-Оленекского междуречья содержит многочисленные места нахождения обломков золотосодержащих конгломератов и гравелитов. Отмечаются также находки конгломератов, содержащих одновременно как золото, так и спутники алмазов. Выделяется комплекс золото-платиноидно-алмазно-рутил-цирконовой минерализации.

В целом работы исследователей 1960-2000 гг. показывают широкое распространение отдельных поисковых признаков золотого оруденения витватерсрандского типа – находки золотоносных псевдоконгломератов, сходство минеральных ассоциаций, морфология и гранулометрический состав частиц золота (тороидальный и пустотелый тип частиц самородного золота размерностью 0,1-0,16 мм) и платиноидов, наличие урановой минерализации при отсутствии подтвержденных коренных докембрийских источников золота [10, 11, 12].

В начале нулевых годов XXI века в преимущественно камеральном отчете по объекту «Щит» были сделаны выводы о нецелесообразности продолжения поисков перекрытых докембрийских золотоносных образований на глубинах более 200-300 м экономически эффективными на тот момент методами [13]. Однако эти данные и методики соответствовали 80-м годам прошлого века, а с той поры как методы, так и экономика отрасли существенно изменились.

#### **Геологическое таргетирование для выявления перспектив оруденения**

Как же на большой недоизученной территории выделить перспективные участки? В наше время разумно применить геологическое таргетирование – комплекс методов для выбора перспективных участков для поиска месторождения. На основе имеющихся первичных данных, литературных материалов, с привлечением данных ДЭЗ спутниковой съемки и БПЛА, спектральной съемки линеаментного анализа. По результатам предварительной камеральной обработки первичных материалов, отчетов и публикаций по данному региону создается ГИС-проект, объединяющий геологические, геохимические и геофизические данных предшественников и современные данные ДЭЗ.

Проводится структурная интерпретация геохимических и геофизических аномалий, анализ линеаментов и мультиспектральных снимков. На основании проекта создаются рабочие модели и выделяются перспективные участки, требующие заверки, по которым возможно проведение рекогносцировочных работ (рис. 6).





Современный подход к анализу информации предполагает интеграцию данных различного масштаба и направления – региональные и детальные карты, геологические, геохимические, геофизические данные; данные мультиспектральной спутниковой съемки, база данных месторождений, рудопроявлений; минерагенические и структурно-геологические исследования.

В лаборатории геоинформационных технологий ИГМ СО РАН собрано бесшовное покрытие данными спектральной съемки всей территории Анабара в масштабе 10 м. Мультиспектральные снимки позволяют выявлять аналогичные эталонным объекты на больших площадях. Мы можем работать с данными, о масштабе и разрешении которых предшественники не могли даже мечтать.

Рекогносцировочные работы позволяют провести разбраковку выбранных на камеральном этапе площадей для лицензирования. Готовятся детальные карты участков с планируемыми маршрутами по результатам анализа материалов. Планируются структурные исследования для коррекции направления поисков в поле, включая экспресс-методы анализа.

Требуют заверки современными методами находки золотосодержащих пород в метаморфических образованиях архея и терригенных протерозоя, проявления платиноидов и урановорудные образования.

### **Выводы**

Создание современной цифровой геологической, геохимической, геофизической и металлогенической основы территории Анабарского массива и его периферии на базе современных методов исследования, новых лабораторных результатов, данных спутниковых мультиспектральных съемок делает возможным прогнозирование и изучение потенциально рудоносных структур. Поиск золоторудных месторождений на современном этапе – это поиск содержащих их структур, так как геология полезных ископаемых – по сути структурная геология в ее «полезном» вещественном выражении.

Ключевое свойство геологической среды – её неоднородность, распределение золота в месторождениях крайне неравномерное; в объеме геологической среды, имеющей многочисленные проявления золота, должны существовать либо коренные источники золота, либо структурные ловушки для накопления металла. Статистика открытий за последнее время показывает, что выявление рудных объектов, перекрытых безрудными образованиями, на существенных глубинах (до 300-600 м и более) с применением дистанционных методов и глубокого бурения не является редким исключением в наше время.

На Анабаре существует перспектива выявления не единичных объектов, а нового для региона типа оруденения в масштабе золоторудно-россыпной провинции, что соответствует масштабу государственной стратегической инициативы «Геология: возрождение легенды». Возможно выделение объектов как для включения в программу воспроизводства МСБ за счет федерального бюджета, так и для лицензирования недропользователями. На данном этапе исследования стоит задумываться уже не о возможности обнаружения благородно-метального оруденения территории Анабара, а о его вероятных типах, что позволит сэкономить годы поисковых работ.

Компания «Золото Анабара» проводит камеральный этап работ по выделению перспективных площадей на периферии Анабарского щита на основании собранной базы геологических данных и дистанционных методов. В настоящее время компания участвует в конкурсе юниоров, проводимом АО «Полиметалл», а также рассматривает предложения инвесторов на начальной стадии работ, до лицензирования площадей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Долгушин С.С., Черкасов Г.Н., Долгушин А.П. Золото-урановый Витватерсранд и поиски его аналогов по южному обрамлению Сибирской платформы. Новосибирск, 2018. — 262 с.
  - 2) Егорова И. В., Михайлов Б. К. Объектный метод анализа обеспеченности запасами полезных ископаемых на примере России // Руды и металлы. 2021. — № 4. — С. 6-21. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10025.
  - 3) Избеков Э.Д., Подъячев Б.П., Разин Л.В. Проблема выявления в пределах Анабаро-Алданского кратона Сибирской платформы аналогов золотых гигантов с попутной платиновой металлоносностью — месторождений типа Витватерсранда // Изв. секции наук о Земле РАЕН. 2006. — Вып. 14. — С. 19-28.
  - 4) Кудрявцев В.А., Казанский Ю.П., Тимофеев В.И. и др. Золотоносность докембрия востока Сибирской платформы // Литология и осадочные полезные ископаемые докембрия Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: СНИИГГИМС, 1973. — С. 157-169.
  - 5) Никифорова З.С., Толстов А.В. Золотоносные россыпеобразующие формации востока Сибирской платформы: происхождение и перспективы // Геология рудных месторождений. — 2022. — Том 64. — № 2. — ФГБУ Издательство «Наука». — С. 165-190.
  - 6) Молчанов А.В. и др. Алдано-Вилуйская провинция — новая рудно-россыпная золотоносная территория на востоке России // Региональная геология и металлогения, 2021. — № 88. — С. 39-64. DOI: 10.52349/0869-7892\_2021\_88\_39-64.
  - 7) Старостин В.И., Избеков Э.Д., Разин Л.В., Сакия Д.Р. Перспективы обнаружения крупных и уникальных месторождений благородных металлов на северо-востоке Сибирской платформы // Вестник Московского Университета. Серия 4. Геология. 2016. — С. 34-43. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-2-34-43>.
  - 8) Тимофеев В.И. О россыпной золотоносности бассейна р. Вилуй // Разведка и охрана недр, 1965. — № 6. — С. 1-5.
  - 9) Волков А.В. и др. Металлоносные конгломераты — источники россыпей в арктической зоне // Арктика: экология и экономика. Т. 11. — № 2. — 2021. — С. 232-243.
- Фондовая
- 10) Гончаров И.М. Отчет по поисковым работам на золото в пределах Оленекского поднятия 1986-1989 гг. Космоаэрогеологическая экспедиция, 1989 г.
  - 11) Забуга Б.Р. Отчет по работе «Поиски докембрийских источников золота и алмазов в Уджа-Билирском районе». Амакинская ГРЭ, 1976 г.
  - 12) Карелин С.В. Отчет по работе «Оценка перспектив россыпной золотоносности Оленекского поднятия». Амакинская ГРЭ, 1988 г.
  - 13) Новиков М.А. Отчет о результатах поисков месторождений золота на восточном склоне Анабарского массива, 1982-86 гг. (Анабарский объект). Амакинская ГРЭ, 1986 г.
  - 14) Шпунт Б.Р. Отчет о ревизионно-поисковых работах на золото партии № 16, проведенных в 1966 году в пределах Лено-Анабарского прогиба и Оленекского поднятия. Амакинская ГРЭ, 1967 г.
  - 15) Шпунт Б.Р. Оценка перспектив алмазоносности и золотоносности северной части Анабаро-Оленекского междуречья. Амакинская ГРЭ, 1974 г.
  - 16) Румянцев В.Д. Полезные ископаемые Юго-Восточной части Анабарского кристаллического массива в 1999-2003 гг. (Объект Щит), Амакинская ГРЭ, 2003 г.

УДК 550.8 (063)  
А 43

Научное издание  
ФГБУ "ВИМС"

Сборник докладов  
Второй научно-практической конференции  
«Актуальные проблемы поисковой геологии»

Компьютерная верстка: С. Б. Смольников, Н. Л. Королева  
Макет обложки: А. А. Полищук  
Редактор: О. А. Арманд

Редакционно-издательский сектор (РИС) ВИМС  
119017, Москва, Старомонетный пер., д. 31  
Тел.: 8 (495) 950 31 80

Подписано в печать 15.05.2025 г.  
Формат 60×84/8. Гарнитура PT Sans. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 15. Тираж 100 экз. Заказ № 2504.  
Отпечатано в ФГБУ "ВИМС". 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 31

ISBN 978-5-6053855-1-6

© Коллектив авторов  
© ФГБУ «ВИМС», 2025 г.

