

На правах рукописи



КАЙЛАЧАКОВ ПЛАТОН ЭДУАРДОВИЧ

**ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ И МИНЕРАЛОГО-
ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА U-Mo-Re БРИКЕТНО-
ЖЕЛТУХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ПОДМОСКОВНЫЙ БАССЕЙН)**

Специальность: 1.6.10 (25.00.11) – Геология, поиски и разведка
твёрдых полезных ископаемых, минерагения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата геолого–минералогических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в лаборатории геологии рудных месторождений Института геологии рудных месторождений, минералогии, петрографии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН) и в Департаменте недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии Российского Университета Дружбы Народов (РУДН).

Научные руководитель: **Викентьев Илья Владимирович**
доктор геолого–минералогических наук,
главный научный сотрудник ИГЕМ РАН,
профессор департамента недропользования и
нефтегазового дела РУДН

Научный консультант: **Дойникова Ольга Александровна**
доктор геолого–минералогических наук,
ведущий научный сотрудник ИГЕМ РАН

Официальные оппоненты: **Левченко Елена Николаевна**
Заместитель генерального директора ФГБУ
«ИМГРЭ»; директор центра научно-
методического обеспечения
геологоразведочных работ на редкометалльные
объекты ФГБУ «ИМГРЭ», доктор геолого–
минералогических наук

Гребенкин Николай Анатольевич
Заведующий отделом урана и редких металлов
ФГБУ «ВИМС», кандидат геолого-
минералогических наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Южно-Уральский
федеральный научный центр минералогии и
геоэкологии Уральского отделения Российской
академии наук (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН)

Защита диссертации состоится «21» апреля 2022 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.364.02 (Д.212.121.04) при ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, зал диссертационных советов (каб. 4-73).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ) по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, <http://mgri.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.364.02 (Д.212.121.04),
доктор геолого–минералогических наук



С.Д. Ганова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Рений – редчайший рассеянный элемент в Земной коре (кларк Re ~ 1 мг/т). К началу 90-х годов, после распада СССР, в России не осталось источников добычи этого остродефицитного, стратегически важного металла. Ежегодная его потребность для Российской Федерации составляет 5–10 т Re, которая покрывается его импортом.

Современная оценка минерально-сырьевой базы Re на территории Российской Федерации показала, что в России наибольший ресурсный потенциал (3/4 от суммарного) составляют месторождения инфильтрационно-полиметального типа. Потенциал Подмосковной провинции, куда относится изучаемое Брикетно–Желтухинское месторождение, составляет ~80% от ресурсов Re указанного типа (Трач, Бескин, 2011). Такие объекты отвечают, по классификации МАГАТЭ, гидрогенным месторождениям урана песчаникового типа, их палеодолинному подтипу (Южно-Техасскому). На них рений добывается как сопутствующий урану компонент; для извлечения используется метод скважинного подземного выщелачивания (СПВ), который в настоящее время обеспечивает более половины мировой добычи урана (Машковцев и др., 2017).

В ходе оценочных работ ИМГРЭ (с участием автора) на Re, Mo и U в Подмосковной провинции (Рязанская область) было впервые в стране разведано и поставлено на баланс (2016г.) месторождение рения. Это гидрогенное U–Mo–Re Брикетно–Желтухинское месторождение. Его ренийность была впервые установлена ФГУП «Урангео» в 2005 г. Месторождение приурочено к горизонтам углей, залегающих в слабо литифицированных песках (Карась и др., 2017). Оно рассматривается в качестве наиболее перспективного объекта промышленной разработки. Запасы месторождения утверждены ГКЗ и составляют 23 т Re по категории С₂.

Актуальность данной работы определяет необходимость поиска подобных месторождений рения рентабельных для добычи, что требует уточнения геолого-структурных и литологических факторов рудоконтроля, недостаточно проработанных ранее. Использование аналитической сканирующей электронной микроскопии как основного минералогического метода для изучения рыхлых руд весьма актуально, поскольку выявление форм рудных компонентов принципиально важно, как для технологии извлечения, так и для изучения процессов металлогенеза в месторождениях песчаникового типа.

Цель и задачи работы. Основной целью настоящей работы является уточнение факторов локализации U-Mo-Re оруденения Брикетно-Желтухинского месторождения.

В рамках проведенного исследования решались следующие задачи:

- 1) анализ влияния на размещение рудных тел факторов региональных (тектонического) и локальных (геолого-структурного, литологического);
- 2) изучение геохимических особенностей руд месторождения;
- 3) уточнение минералого-геохимической зональности по Re, Mo, U, Se в разрезе месторождения;
- 4) исследование минерального состава руд месторождения;
- 5) выявление форм нахождения основных компонентов (Re, Mo, U, Se) в рудах;
- 6) реконструкция последовательности и механизмов рудообразования.

Личный вклад соискателя, фактический материал и методы исследования.

Материалы, лежащие в основе диссертации, получены автором в процессе оценочных работ на рений и попутные компоненты на Брикетно-Желтухинском U-Mo-Re месторождении (Рязанская область), проведенных ИМГРЭ в 2013–2015 гг. В основе исследований лежат результаты структурно-геологических построений (карт, литолого-геохимических разрезов и т.д.), рудно-минералогических и геохимических исследований 2016–2021 гг., выполненных автором в ИГЕМ РАН.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии при выполнении работ на всех этапах исследования U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения, а также при составлении отчета с подсчетом запасов Re и попутных компонентов. Автор принимал непосредственное участие в опробовании рудовмещающей песчаной толщи, составлении и оформлении геолого-геохимических колонок скважин, геологической карты и разрезов, плана участка месторождения; при подготовке диссертации автор самостоятельно выполнил 3 новых геологических разреза.

Для геохимических исследований использовалась база данных (~2900 проб), собранная при участии автора во время работы в ИМГРЭ в 2013-2016 гг. Основные методы исследования химического состава пород и руд: масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), рентгено-флуоресцентный (XRF), кинетический (на Re) (ИМГРЭ) и нейтронно-активационный анализы (ИЯИ РАН). Методами рентгенофазового анализа определен минеральный состав богатых рением руд с заметной примесью глинисто-алевритового материала; количественный минералогический анализ выполнен методом Ритвельда (ИГЕМ РАН). Рыхлый характер рудных образцов и высокодисперсные, микронные, размеры собственных рудных фаз обусловили выбор электронной микроскопии главным методом их минералогического изучения (электронный микроскоп JSM-5610, оснащенный энергодисперсионными спектрометрами микроанализа INCA-450, AztecOne) (ИГЕМ РАН).

В период 2016-2021 гг. автор, помимо полевых работ, собрал и проанализировал фондовую и опубликованную литературу по геологическому строению изучаемой и сопряженных территорий; проанализировал регионально-тектонические факторы размещения месторождения; провел уточнение фрагментов ряда литологических колонок и геологических разрезов месторождения; выполнил минералогические исследования руд.

В ходе картосоставительских работ все геологические материалы (карты, разрезы и т.д.) для Брикетно-Желтухинского месторождения объединены автором в цифровую модель в единой системе координат с использованием современных компьютерных технологий (программные пакеты ArcGIS, Surfer, CorelDraw). Методами математического моделирования в программном пакете Micromine выполнена 3D-модель для участка месторождения, на основании которой были построены разрезы месторождения.

Научная новизна:

1. Установлены главные формы рения: а) связанная с органическим детритом; б) минеральная – в виде изоморфного вхождения его в состав молибденита.
2. Установлена ролловая структура рудной залежи с «головной» частью ориентированную на север.
3. Сравнительным геохимическим анализом в рудах месторождения выявлены три группы парагенетических химических элементов: а) сульфидный парагенезис – элементы

наиболее тесно связанные с рением; б) редкометально-редкоземельный парагенезис; в) группа элементов карбонатного парагенезиса.

4. Экспериментами по десорбции U, Mo, Re для руд месторождения установлены формы нахождения рудных элементов: Re – более половины его (56%) связано с углистой массой, около 30% – в ионообменной форме (глинистый и органический материал), 13% – слабосвязанная; Mo – в равных долях распределен между органической и минеральной формой; U – в богатых Re участках находится преимущественно в слабосвязанной форме, легко мигрирует с водными растворами (>90%).
5. Установлена минеральная форма молибдена: преимущественно Re-содержащий иордизит (~1.7 мас. % Re), реже кристаллический Re-содержащий молибденит (~1.3 мас. % Re);
6. Впервые в рудах месторождения установлена минеральная форма селена – джаркениит (FeSe₂); изучены различные морфологические типы пирита: кристаллы и зернистые массы, фрамбоиды, трубчато-волокнистые псевдоморфозы по ископаемой древесине.

Практическая значимость работы. U-Mo-Re Брикетно-Желтухинское месторождение выделяется среди окружающих его рудных объектов Подмосковского бурогоугольного бассейна необычным, комплексным составом руд с промышленными содержаниями рения >1.0 г/т, что определяет важность исследования данного объекта как перспективного для разработки.

Эксперимент по десорбции Re установил, что преобладающая часть рения находится в ионообменной форме и связана с органическим веществом, что расширяет возможности его добычи с помощью метода скважинного подземного выщелачивания (СПВ).

На пробах руд опробована неразрушающая методика нейтронно-активационного анализа и доказана ее эффективность для определения повышенных содержаний Re, что особенно актуально в случае образцов с заметным содержанием органического вещества $C_{орг}$, учитывая высокую подвижность элемента в лабораторных условиях. Это заключение позволяет рекомендовать применение метода в практике геологоразведочных работ на Re.

Апробация работы. Основные результаты работы публиковались на Международных научно-практических конференциях «Рений, вольфрам, молибден-2016» (Москва, Гиредмет, 2016), «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты» (Новосибирск, 2016); на конференциях молодых ученых и специалистов с международным участием «Геология, поиски и комплексная оценка месторождений твердых полезных ископаемых» (Москва, ВИМС, 2017), «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2017, 2019, 2021), а также на Всероссийской конференции, посвященной 120-летию со дня рождения академика А.Г. Бетехтина «Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: новые горизонты» (Москва, 2017). Материалы опубликованы в трудах конференций «От учебного задания – к научному поиску, от реферата – к открытию» (Абакан, 2018), «Ядро-2020. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии» (Санкт-Петербург, 2020), на 63-ей научной конференции МФТИ (Долгопрудный, 2020) и на V Международном симпозиуме «Уран: геология, ресурсы, производство» (Москва, ВИМС, 2021).

Публикации. В рецензируемых изданиях опубликовано 4 статьи; в других изданиях – 4 статьи в материалах конференций, 6 тезисов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, включающего 145 наименований, содержит 143 страницы, 46 иллюстраций, 11 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научным руководителям: д.г.-м.н. Викентьеву И.В. за чуткое руководство и неоценимую помощь на всех этапах работы; д.г.-м.н. Дойниковой О.А. за консультации по минералогии и геохимии палеорусловых месторождений урана, за совместное проведение АСЭМ исследований, ценные советы и замечания. Большую роль в развитии научных взглядов автора сыграли сотрудники ИГЕМ РАН: чл.-корр. РАН Петров В.А., д.г.-м.н. Волков А.В., д.г.-м.н. Кочкин Б.Т.; помогали в работе сотрудники лаборатории ГРМ ИГЕМ РАН. Автор выражает благодарность д.г.-м.н. Кременецкому А.А., Карасю С.А. и Орлову С.Ю. (ИМГРЭ) за организацию полевых работ и помощь в освоении навыков геологической документации керна; особая признательность – руководству ИМГРЭ за предоставление каменного материала для прецизионных исследований; автор благодарен Смирнову Д.И., Смирновой Н.С., Ключареву Д.С., д.г.-м.н. Бескину С.М., к.г.-м.н. Максимюк И.Е. за всестороннюю поддержку. За ценные советы по рукописи диссертации автор благодарит д.г.-м.н. Щеточкина В.Н. (ВИМС). За выполнение аналитических определений и помощь в интерпретации результатов автор выражает признательность сотрудникам ИМГРЭ: Набелкину О.А., Иванову В.А., Пичугину И.А., Лебедевой Г.Г. За помощь в исследованиях, и полезные замечания автор благодарит преподавательский состав Департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН; за ценные советы и поддержку на первых этапах работы – профессора, д.г.-м.н. Дьяконова В.В., зав. каф. МПИ и их разведки им. В.М. Крейтера; за конструктивную критику диссертации – профессора, д.г.-м.н. Георгиевского А.Ф.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН, а также проекта РФФИ 19-35-90095_Аспиранты, проекта Минобрнауки РФ 075-15-2020-802, проекта IGCP 675 Sandstone Type Uranium Deposits.

Структура автореферата сформирована согласно защищаемым положениям.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

1. В субгоризонтально залегающей рудовмещающей песчаной толще (бобриковский горизонт, визе) гидрогенного палеодолинного U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения установлены пологие куполовидные морфоструктуры с раздувами мощности, осложняющими стратиформные субпластовые рудные тела. В меридиональном сечении залежи отвечают роллам с классическим распределением U, Mo, Re – с широкими ореолами рения, охватывающими участки повышенных концентраций молибдена и урана.

Брикетно-Желтухинское U-Mo-Re месторождение в южной части Подмосковского бурогоугольного бассейна локализовано в палеорусловых и дельтовых угленосных песчаных отложениях бобриковского горизонта визейского возраста, залегающих на известняках фаменского яруса и перекрытых более молодыми неоген-четвертичными песками и глинами. В тектоническом плане позиция месторождения отвечает южному плечу

Пачелмского авлакогена, рассеченному меридиональной разломной зоной. Территория находится в зоне сочленения Воронежской антеклизы и Московской синеклизы, и принадлежит линейной структуре, разделяющей мегаблоки Сарматия и Волго-Урاليا (рис. 1 врезка) (Bogdanova et al., 2008; Kuznetsov et al., 2010).

В процессе исследований были изучены бурением как рудовмещающая песчаная толща бобриковского горизонта, так и, отчасти, подстилающие их фаменские карбонатные отложения.

Основание разреза месторождения сложено породами фаменского яруса верхнего девона, которые представлены в основном слоистыми известняками, при подчиненной роли брекчиевидных доломитов, включают маломощные прослои глин и мергелей. Мощность пачек составляет первые десятки сантиметров, подчиненную роль играют маломощные прослои коричневатых-серых песков и серых алевроитов, а мощность слойков от 0.5 мм до нескольких миллиметров. В доломитах в виде тонких прослоев и по зеркалам скольжения развита сульфидная тонкорассеянная вкрапленная минерализация. Содержания Re в карбонатных породах с сульфидной минерализацией в целом не высокие, но близки к рудным ($\sim 0.05\text{--}0.5$ г/т); C_{Re} повышены до первых г/т в терригенных прослоях и контактирующих с ними тонкослоистых доломитах.

Мощность рудовмещающих отложений бобриковской свиты в пределах рудного поля достигает до 60 м. Рудоносные отложения в основном представлены серыми и темно-серыми мелко-среднезернистыми кварцевыми песками, обогащенными органическим детритом и содержащими рассеянные до обильных скоплений сульфидов, часто образующих псевдоморфозы по углистому детриту. К линзам и прослоям такого углистого детрита тяготеют области повышенных и максимальных концентраций Re, а также Mo и U.

Русловые накопления слагают основную часть разреза. Относительно грубообломочные средне- и крупнозернистые, плохо сортированные разности песков развиты спорадически и в основном соответствуют стрежневой фации (Карась и др., 2017). Песчаные породы этой фации приурочены к основному тальвегу палеореки, который прослеживается в меридиональном направлении в пределах западной части месторождения, шириной около 1 км (рис. 2). Пойменные фации распространены, в основном, на западном и восточном флангах месторождения, где представлены глинами, реже алевроитами и прослоями бурых углей; мощность их незначительная (2–4 м), редко достигает 15–20 м.

Рудные зоны месторождения приурочены в основном к отложениям потоковых и пойменных фаций – песчаным породам, насыщенным органикой (обломки угля, достигающие гравийной размерности), многочисленными маломощными прослоями глин, углистых глин и углей. Повышенные концентрации рения, а также урана и молибдена, особенно тесно ассоциируют с горизонтами углей или углистых пород.

В основании перекрывающей неоген-четвертичной толщи присутствует кремнистый горизонт мощностью до первых десятков сантиметров, который сложен песками, насыщенный гравийными, реже более крупными, обломками кремней и обломками окремнелых известняков поздневизейско-серпуховского возраста (Карась и др., 2017).

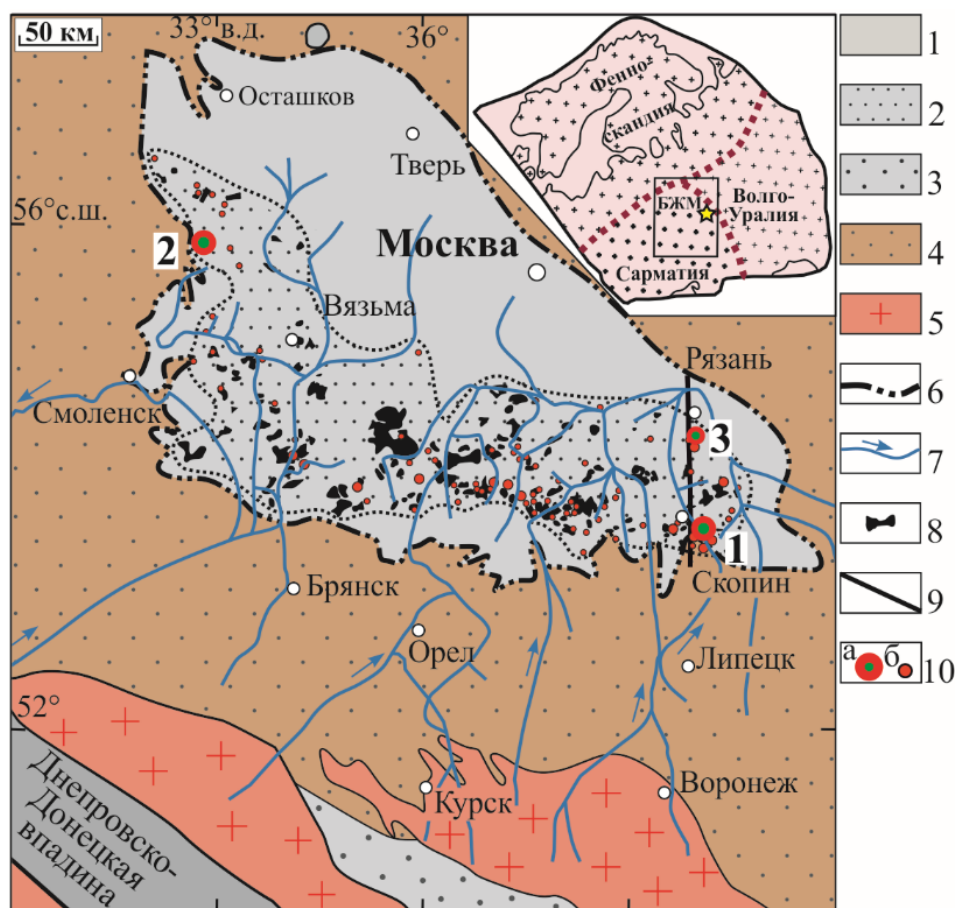


Рис. 1. Палео-географическая реконструкция центральной части Восточно-Европейской платформы для ранне-средневизейского времени, по (Палео-геоморфологический ..., 1983; Махлина, 1993; Карась и др., 2017) с изменениями; на врезке – контуры протократонов ВЕП (упрощено по Kuznetsov et al., 2010).

1–3 – нижне-средневизейские отложения: 1 – преимущественно глинистые (озерные, мелководно-морские фации), 2 – преимущественно песчаные (дельтовые фации бобриковских палеорек), 3 – песчаные (аллювий); 4 – верхнедевонско-нижне-

каменноугольные карбонатно-терригенные отложения области размыва; 5 – выступы докембрийского кристаллического фундамента; 6 – граница визейского Подмосковного бурого угольного бассейна; 7 – русла палеорек с направлением течения; 8 – болота (залежи бурого угля); 9 – долгоживущий Двуреченско-Липецкий разлом; 10 – а) объекты с Re минерализацией: Брикетно-Желтухинское (1), Бельское (2) месторождения, 3 – Алексеевское U-рудное проявление, б) проявления урана.

Морфологию русла Скопинской палеореки, пересекавшей в визейское время территорию месторождения с юга на север, вероятно, определила меридиональная Двуреченско-Липецкая зона тектонических нарушений: она контролировала позицию эрозионной депрессии, в которой локализовался основной поверхностный водоток общей северной ориентировки. Усиленное меандрирование палеореки было вызвано системой поперечных уступов и валообразных растущих поднятий, ориентированных в ЮВ и В-ЮВ направлениях (Государственная ..., 2015). В ранневизейский период под воздействием поверхностных и, особенно, подземных вод, карбонатные породы, залегающие в основании речной долины, подвергались карстообразованию, что также способствовало развитию отрицательных форм рельефа. В настоящее время, по данным бурения, поверхность известняков неровная, с многочисленными ложбинами глубиной до 5 м. Центральная часть месторождения отвечает относительно возвышенному (до 30 м) участку известнякового основания и характеризуется горизонтальным залеганием покрывающих его рудовмещающих песчаных пород.

На Брикетно-Желтухинском месторождении по содержанию 0.1 г/т Re в породах, принятому в качестве бортового, была оконтурена практически единая рудная залежь, в плане представляющая слабоизвилистую субгоризонтальную ленту, протянутую с юга на север (рис. 2). В пределах залежи выделяются 3 типа рудных тел:

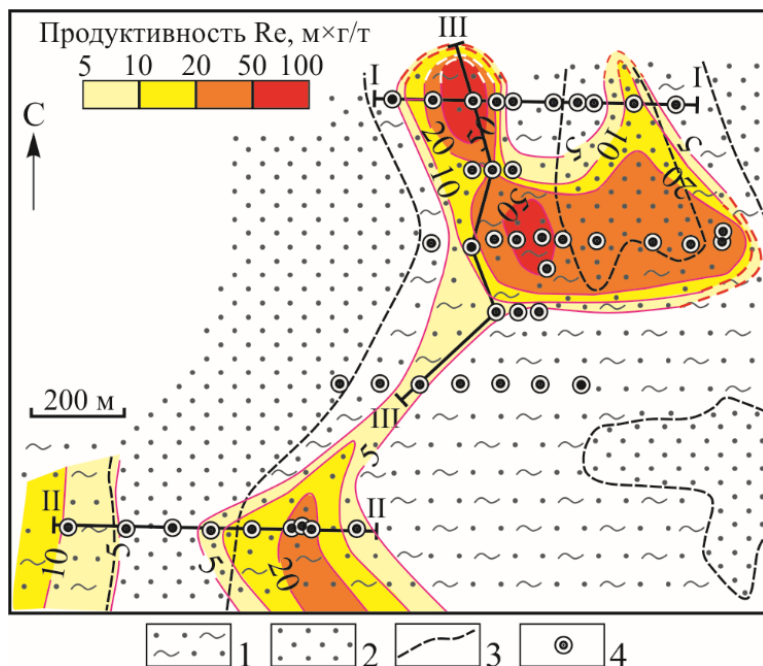


Рис. 2. Изолинии продуктивности Re оруденения в бобриковской свите Брикетно–Желтухинского месторождения на литолого-фацальной схеме, по (Карась и др., 2017) с дополнениями. I-I, II-II и III-III – линии разреза.

1 – пески с прослоями и линзами углистых глин, углей, алевритов; 2 – пески разномерные с гравием и редкими прослоями глин; 3 – границы преобладания фаций русловых (не угленосные) или пойменных, старичных, лагунных (угленосные); 4 – скважины.

– субпластовые, линзовидные тела с горизонтальным и пологим залеганием, мощностью от первых до нескольких метров, протяженностью до первых сотен метров; они находятся в пределах интервалов, сложенных песками серой окраски.

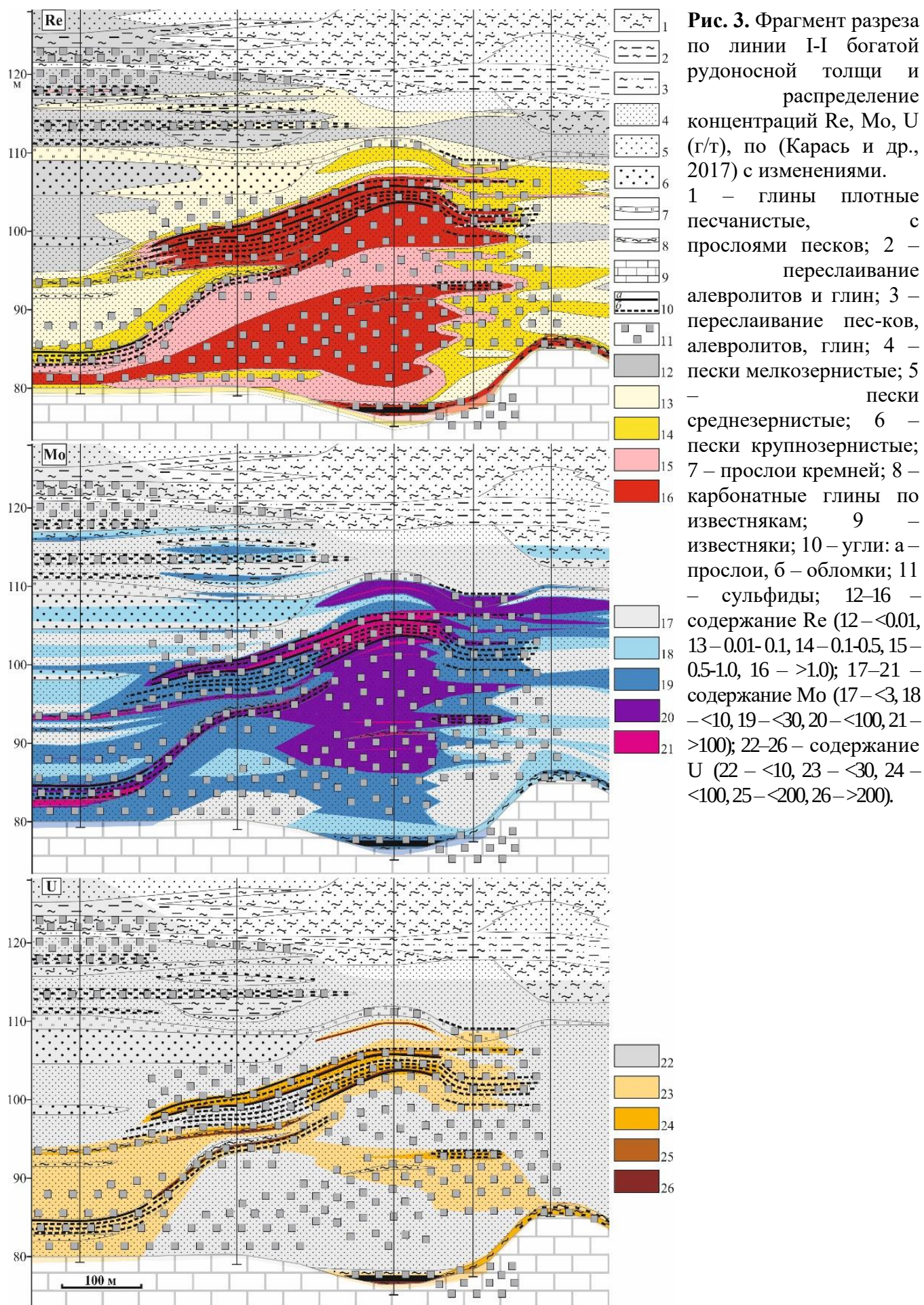
– отдельные тонкие (от 5 до 10 см) прослои углей и иногда серых глин с высокими концентрациями Re (выше 1 г/т).

– рудные тела мощностью до первых метров, расположенные непосредственно выше водоупорных известковистых глин в кровле фаменских известняков. Они развиты в высокопроницаемых разномерных песках базального горизонта бобриковской свиты, насыщенных углистым детритом, и повторяют форму поверхности кровли: в ложбинах и впадинах этой кровли мощности рудных тел заметно увеличиваются.

Мощность рудной залежи составляет в среднем ~5–8 м, достигая в раздувах 15–42 м (рис.3), ширина такой достигает 700 м, а длина в пределах детально изученного участка – 1400 м; общая вероятная ее протяженность – свыше 2 км.

$S_{орг}$ в песках изменяется в широких пределах: от 0.01 % в уплотненных “выбеленных” песках и до ~10% в темно-серых песках; в этих же пределах изменяются содержания сульфидной серы (Культин и др., 2007). Весь разрез рудоносной толщи характеризуется содержаниями $Re > 0.01$ г/т. Оруденение, оконтуренное по среднему содержанию $Re = 0.5$ г/т, достигает 42 м мощности. Максимальные содержания Re зафиксированы в углисто-глинистых пропластках мощностью 5–10 см (40–589 г/т), причем наиболее высокие содержания приурочены к слоям этих пород, залегающим в кровле и, местами, в подошве рудной залежи. В песках содержания Re достигают 10–50 г/т.

Несмотря на близкий к стратиформному характер рудной залежи, обращают на себя внимание развитые в ее пределах структурные элементы, нарушающие субгоризонтальное залегание песчаной толщи: оно осложнено раздувами, связанными с увеличением мощности отдельных горизонтов песков (рис. 3). Эти раздувы обусловлены прогибами подошвы бобриковского горизонта (в понижениях кровли подстилающих известняков) и антиформными выгибаниями над ними слоев вышележащей песчаной толщи, которые маркируются прослоями углей.



При совмещении в плане прогибов подошвы рудовмещающей толщи и “гребней” воздымания вышележащих слоев, ближе к кровле бобриковской толщи, наблюдаются своеобразные раздувы – биклиналильные структуры. Скорее всего, указанные куполовидные структуры имеют гидротермально-гидравлическую природу и возникли в результате постседиментационных деформаций рудовмещающей толщи; также они могли формироваться и при проявлении конседиментационной тектоники.

Важно, что именно эти участки раздувов мощности песков обусловили появление не только морфологических, но и концентрационных рудных столбов. Таким образом ролловые тела осложняются рудными столбами. На разрезах (рис. 3, 4) присутствуют субвертикальные участки повышенных и максимальных содержаний металлов, особенно отчетливо выраженные по Re и Mo. При этом такое же распределение характерно для сгущений рассеянно-вкрапленной пиритизации, тяготеющей к вышеупомянутым «столбам». Необходимо отметить, что в керне скважин, пересекающих фаменские известняки, где также фиксируется пиритизация, развиты в целом не характерные для известняков зоны брекчий, маломощные кварц-карбонатные прожилки и участки доломитизации. Вероятно, эти зоны брекчирования маркируют позицию подводящих каналов, подпитывающих гидрогенное рудообразование. Логично предположить, что формирование этих куполовидных морфоструктур было обусловлено деятельностью низкотемпературной гидротермально-гидравлической системы и является следствием постседиментационных деформаций толщи.

2. Экспериментально установлены формы нахождения рудных элементов в богатых Re рудах: Re (56%) и Mo (47%) преимущественно связаны с органическим веществом руд; значительная часть Re (30%) представлена ионообменной формой, а Mo (43%) – прочносвязанной минеральной; доминирующее количество урана (> 90%) находится в слабосвязанной подвижной форме. В рудах месторождения выявлена значимая положительная корреляция Re с Mo, U, Ag, Se, Zn, Co, Ni, Pb.

Основное внимание при проведении исследований было сосредоточено на двух главных типах рудоносных пород: алевритово-песчаных породах, обогащенных сульфидами, и углистых алевритах, содержащих сульфиды, поскольку именно с ними связаны высокие концентрации рения. Рудовмещающие пески характеризуются высоким содержанием SiO₂ (до 95 мас. %); здесь повышенные содержания характерны для U, Mo, Se и Re (при крайне высокой степени рассеяния последнего в литосфере), и для спутников рудных элементов –V, Co, Ni, Zn, As.

Максимальное вертикальное распространение *рениевой* минерализации, ореол которой оконтурен по бортовой концентрации ($C_{Re} = 0.5$ г/т), составляет 42 м. Эти ореолы включают ореолы молибденовой и урановой минерализации, что свидетельствует о геохимическом сходстве поведения U, Mo и Re в породах месторождения (рис.3, 4). Интервалы разреза с максимальными концентрациями U, Mo и Re на месторождении практически совпадают друг с другом, однако местами рений показывает заметно повышенные концентрации (> 0.5 г/т) и в тех интервалах, где U и Mo практически отсутствуют. На основании таких наблюдений можно предположить, что рений в рудах присутствует в нескольких формах.

Зона распространения *молибденового* оруденения, оконтуренная по борту $C_{Mo} = 50$ г/т, практически совпадает с таковой для урана, а максимальные концентрации Mo и U установлены в одних и тех же интервалах разреза.

Ореол *селеновой* минерализации, оконтуренный по борту $C_{Se} = 18$ г/т, прослеживается в верхней части зоны комплексного оруденения; иногда он располагается между интервалами с повышенным C_U , и часто распространяется в светлые серые пески с низким содержанием сульфидов и $C_{орг}$.

По данным химических анализов, в керновых пробах, помимо основных Re, Mo, U, а также Se (их обычного спутника в месторождениях «песчаникового» типа), концентрации многих «рудных» элементов также повышены, среди них (в порядке снижения): Zr, Zn, Mn, Ni, As, Co, V, Pb, Y, Cu, а также Tl и Ag. Наиболее высокое обогащение металлами наблюдается в углистых слойках, залегающих среди песков. Тенденция к возрастанию степени обогащения металлами наблюдается в следующих рядах: от светлоокрашенных песков к темным, почти черным и от крупно- и грубообломочных разностей песков к тонкозернистым; одновременно в этих рядах заметно увеличиваются содержание $C_{орг}$ (от 0.01–0.5 до 1–10 мас. %) и концентрация сульфидов (от первых процентов до 20–30 об. %).

При статистической обработке результатов анализа 2866 проб, содержащихся в базе геохимических данных, была выявлена значимая положительная корреляция C_{Re} с содержанием большинства химических элементов рудной ассоциации. Максимальные положительные значения коэффициента парной корреляции с Re были установлены для: Mo, Ag, Zn, U, Se, Co; несколько меньшие значения – Tl, As, Y, Ni, V, S и Pb. Близкие особенности поведения установлены для урана. Концентрации U в рудах так же, как Re, имеют положительную корреляционную связь с Mo, S и Se.

Проведен сравнительный анализ проб руды с различным содержанием рения и пород, в разной степени минерализованных. Все проанализированные пробы были подразделены на 4 группы: пограничные значения концентраций рения составили 0.1, 0.5, 5 и ≥ 5 г/т.

Выявлены три группы парагенетически связанных химических элементов. Основными признаками такой связи считались сродство элементов, выраженное стабильно высокими коэффициентами парной корреляции, и сходные тенденции снижения/роста концентраций элементов при переходе от богатых руд ($Re \geq 5$ г/т) к бедным рудам и слабо минерализованным породам. Выделяются:

1) *Сульфидный (гидротермальный)* парагенезис элементов, наиболее тесно связанных с рением: Fe, S, Mo, Zn, Ni, Co, Cu, As, Se, Cd, Sb, Tl, Pb, Bi, Ag; все они заметно концентрируются в богатых (≥ 5 г/т Re) рудах;

2) Группа элементов *редкометально-редкоземельного* парагенезиса: Ti, U, V, Cr, Sr, Th, Y, Zr, P, из них U, V, Y концентрируются, в основном, в богатых рениевых рудах;

3) Группа элементов *карбонатного* парагенезиса: Mg, Ca, Mn. Руды с максимальным содержанием рения (≥ 5 г/т Re) заметно обогащены Ca и Mn; тогда как содержание Mg в богатых рудах слабо превышает значения в рядовых (0.5–5 г/т Re) и бедных (0.1–0.5 г/т Re) рудах. Однако по C_{Mg} все разности данных групп заметно уступают неоруденелым ($Re < 0.1$ г/т) доломитам, подстилающим песчаную толщу.

В распределении Re, U, и Mo была выявлена зональность рудных элементов (рис. 4), характерная для пластово-инфильтрационных месторождений роллового типа,

образованных эпигенетическими процессами (Перельман, 1980; Максимова, Шмариович, 1993). Проведен детальный погоризонтный анализ ореолов осаждения U, Mo и Re, с учетом опробования на Se керн лишь нескольких скважин. От тыловой окислительной зоны к передовой, восстановительной, эта минералого-геохимическая зональность выражена следующим рядом: $(\text{Fe}^{+3} + \text{Se}) \rightarrow (\text{Fe}^{+2} + \text{Se}) \rightarrow (\text{Se} + \text{U}) \rightarrow \text{U} \rightarrow (\text{U} + \text{Mo}) \rightarrow \text{Mo} \rightarrow (\text{Re} + \text{Mo}) \rightarrow \text{Re}$. На Брикетно-Желтухинском месторождении картируются фрагменты этого ряда, где широкий ореол рениевой минерализации охватывает ореолы молибдена и урана. В ряде случаев, особенно в «головной» части роллов, рений в повышенных концентрациях развит в интервалах, где U и Mo практически отсутствуют.

Гидрогенная зональность роллового типа была наложена на первичное распределение U, Mo, Re и Se в песчанистой толще, вероятно, в триасе или на рубеже триаса и юры (см.

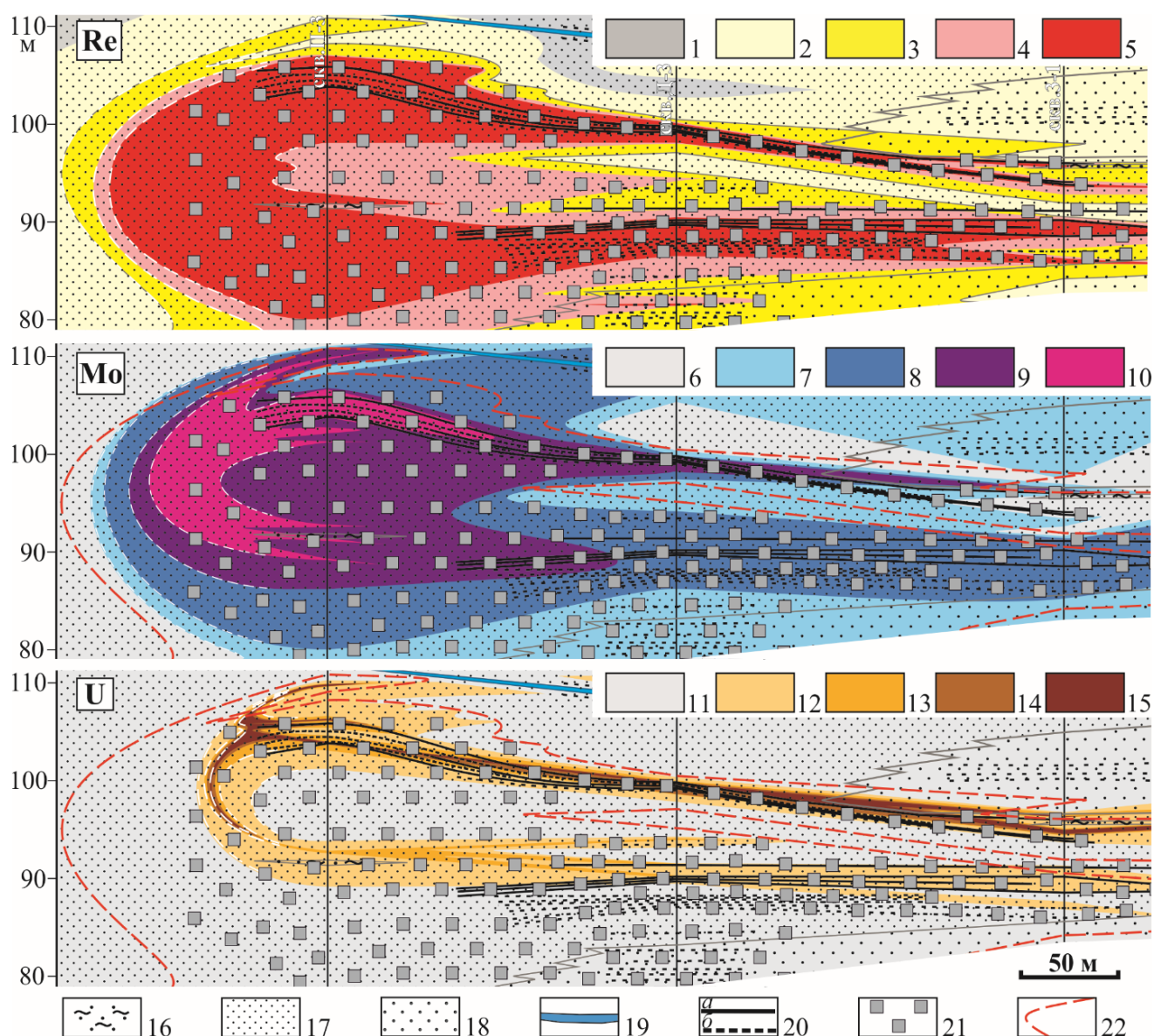


Рис. 4. Рудное тело в форме классического ролла – северная часть продольного разреза III-III с распределением концентраций Re, Mo, U (г/т) в рудной толще.

1–5 – содержание Re (1–<0.01; 2–0.01–0.1; 3–0.1–0.5; 4–0.5–1.0; 5–>1.0); 6–10 – содержание Mo (6–<3; 7–<10; 8–<30; 9–<100; 10–>100); 11–15 – содержание U (11–<10; 12–<30; 13–<100; 14–<200; 15–>200); 16 – глины плотные с прослоями песков; 17 – пески мелкозернистые; 18 – пески среднезернистые; 19 – прослои кремней; 20 – угли: а – прослои, б – обломки; 21 – сульфиды; 22 – контур рудного тела по $\text{C}_{\text{Re}} \geq 0.5$ г/т.

пояснения в Викентьев, Кайлачаков, 2020). Локализация повышенных концентраций рудных элементов в пределах роллов контролируется неравномерным характером распределения восстановителей (углистый детрит, сульфидная вкрапленность) в рудовмещающей толще, а раздувы рудных тел – положением над предполагаемыми участками поступления восстановительных вод глубинной циркуляции.

В локализации оруденения на изучаемом месторождении отмечаются закономерности, характерные для пластово-инфильтрационных месторождений палеодолинного типа: 1) приуроченность рудных тел к крупной палеодолине; 2) зональность роллового типа, фиксирующаяся в продольном разрезе северной части месторождения U-Mo-Re (Se); 3) более широкое, по сравнению с ураном, распространение рения в разрезах, при частом совпадении их максимальных концентраций; 4) приуроченность зон окисления к наиболее проницаемым участкам пород (мелко-среднезернистые пески); 5) наличие в рудоносной толще охристых пятен – уплотненных песчаников и глин желтой или оранжевой окраски, вызванной окислением сульфидов с образованием Fe-гидроксидов, которые характеризуются относительной обогащённостью Se и обедненностью Re.

Учитывая сложный характер ореолов Re, Mo, U и Se, можно полагать, что зональность роллового типа была осложнена в неоген-четвертичное время при поступлении пластовых кислородных вод в проницаемые породы бобриковского горизонта с юга из долин реки Верда и ее притоков, врезанных в рудовмещающие отложения.

Для определения форм нахождения U, Re и Mo из образца руд Брикетно-Желтухинского месторождения, наиболее богатого рением (углистого алевролита с повышенным содержанием данных элементов), нами были проведены эксперименты последовательного выщелачивания с использованием модифицированной схемы Тессьера (Tessier et al., 1979). Исследуемая проба последовательно промывалась: дистиллированной водой (выделение слабосвязанной формы), 1М раствором $MgCl_2$ (выделение обменной формы), 33% H_2O_2 , (выделение металлов, связанных с органическим веществом) и 10М раствором HCl (выделение прочносвязанной формы). Оставшийся образец анализировался на содержание остаточной формы металлов (неизвлекаемой). Результаты опытов показали, что значительная часть рения и молибдена находится в ионной форме и связана с органическим веществом по механизму комплексообразования (рис. 5).

Основная часть рения (56%) связана с органическим веществом углистой массы. Почти 30% Re представлено его ионообменной формой, которая может проявляться как в органических соединениях, так и в глинистых минералах. Рассматривая ионообменную форму рения, необходимо отметить, что для углей ионный обмен происходит с замещением щелочных и щелочноземельных металлов, а также за счет обменного водорода и алюминия. Кроме того, возможен ионный обмен по принципу комплексообразования, характерный для углей (углистой массы). Слабосвязанная форма Re (13%) предположительно относится к органическим соединениям. Прочносвязанная и остаточная формы Re в рудах (суммарно менее 2%) связаны с Mo-сульфидами, что обосновано находками минеральных зёрен молибденит/иордизита с ~1.7 мас. % Re (рис. 6); роль этих минеральных форм – подчиненная.

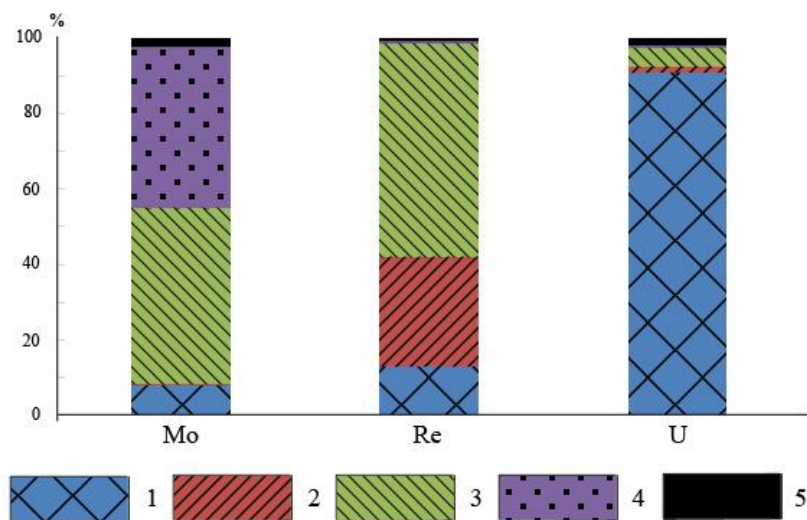


Рис. 5. Распределение различных форм Mo, Re, U в образце углистого алевролита Брикетно-Желтухинского месторождения по результатам экспериментов последовательного выщелачивания этих элементов.

Формы нахождения металлов: 1 – слабосвязанная, 2 – ионообменная, 3 – в органическом веществе, 4 – прочносвязанная, 5 – остаточная.

Почти половина содержащегося в руде молибдена (47%) представлена в органическом веществе пробы. Немного меньше (43%) находится в прочносвязанной форме, что подтверждается наличием чешуек молибденита в составе богатых Re и Mo руд. Слабосвязанная форма Mo (8%), вероятно, соотносится с плохо раскристаллизованным веществом дисперсных Mo-сульфидных образований.

Практически весь присутствующий в пробе уран (более 90%) находится в слабосвязанной, подвижной форме. Вероятнее всего – это уранильная форма $(\text{UO}_2)^{2+}$, в которой уран легко мигрирует в водной среде, образуя минералы уранила (урановые слюдки), а также комплексные органические соединения уранила, обеспечивающие его миграцию с фульвокислотами. Связанные с органикой 5% урана представляют, более прочные органические соединения уранила. Незначительную часть ионообменной формы урана (~1%) можно объяснить занятостью большинства обменных позиций более конкурентно-способными металлами с большей ионной силой. Прочносвязанная форма урана (~1%) предположительно соответствует дисперсным минералам урана, нерастворимым в HCl. Неизвлекаемая форма (~2%) относится к урану в составе крайне устойчивых минералов (циркон, ксенотим, монацит).

Таким образом, в богатом рением образце основная часть рения связана с органической и ионообменной формами; последняя реализуется как с органическим веществом, так и с глинистой составляющей рудной пробы. Другие формы Re в рудах (прочносвязанная и остаточная) имеют резко подчиненное значение. Молибден примерно в равных долях распределен между органической и минеральной (прочносвязанной) формами. Уран в основном находится в подвижной, вероятнее всего в уранильной, форме.

3. Уточнен минеральный состав рудных компонентов Брикетно-Желтухинского месторождения:

- Re+Mo – содержатся в молибдените (~1.7 мас. % Re) и иордизите, несущих примеси Se, As, Zn, Co, Ni (~1.5 мас. %);
- селен – представлен Se-пиритом, клаусталитом PbSe и джаркенитом FeSe₂;
- уран – установлен в составе акцессорных минералов: циркон, ксенотим, монацит и РЗЭ-фосфат (3–6 мас. % U); встречается оксид урана (~1 мкм) в пирите.

Оруденелые пески и алевропесчаные породы по составу преимущественно кварцевые олигомиктовые, высокозрелые. Среди обломочных зерен существенно преобладает кварц (>95 об. %) в виде окатанных овальных мутных зёрен (0.5–2.5 мм) светло-серой окраски. В подчиненном количестве: полевые шпаты (альбит, микроклин), слюды (мусковит, гидрослюды) и литокласты (кремни, кварцевые песчаники). Еще более редки темноцветные минералы (амфиболы и пироксены). В песках рудных интервалов встречаются агрегаты мелко- и крупнообломочных зерен кварца, сцементированных сульфидами; в отдельных горизонтах присутствуют многочисленные обломки угля размерностью до нескольких миллиметров.

Среди акцессорных минералов тяжелой фракции песков и алевритов преобладают пирит (рис. 6а) (реже марказит), циркон, титаномагнетит, ильменит. В незначительном количестве присутствуют анатаз, лейкоксен, гематит, апатит, ставролит; в единичных микронных зернах – сфалерит, халькопирит, пирротин, монацит, дистен, андалузит, касситерит и турмалин. Суммарная доля акцессорных минералов в составе песчаных пород обычно крайне мала; исключением являются участки пиритизации, где доля сульфидов местами достигает 10–15 об. %. В углистых частичках пород рудовмещающего бобриковского горизонта постоянно присутствуют сульфиды в виде мелких, обычно микронных выделений и спорадически – включения минералов U и Mo.

Помимо разнообразных форм пирита, в изученных образцах руд были встречены очень мелкие (микронные) кубические кристаллы селенистого пирита $\text{Fe}(\text{S}, \text{Se})_2$, сцементированные более поздним пиритом, не содержащим примеси селена (рис. 6б). Морфология выделений Se-пирита позволяет судить об относительно более раннем его формировании, чем окружающего бесселенистого пирита. В единичных выделениях встречены галенит, халькопирит, сфалерит (с примесью Cd), клаусталит PbSe . Морфология обнаруженного в образцах селенида железа FeSe_2 – массивные зерна, часто близкие к кубической форме, – позволила диагностировать его как джаркенит (рис. 6а). В составе джаркенита установлены примеси Co (2 мас. %) и Ni (1.6 мас. %).

Исследование методами количественного рентгенофазового анализа подтвердило, что в минеральном составе руд, как правило, преобладают кварц и/или глинистые минералы. В заметном количестве присутствуют полевые шпаты (альбит и микроклин), сульфаты (гипс, водный Ca-сульфат бассанит, K-Fe-сульфат ярозит) и сульфиды (пирит, марказит). Спорадически встречаются гиббсит, доломит, хлорит, анатаз. Следует отметить, что марказит в заметном количестве (0.5 мас. %) был встречен только в пробе с повышенным содержанием элементов Re, U, Fe и S, высоко обогащенной углем. Карбонатная порода, которая по содержанию рения (0.75 г/т) соответствует бедным рудам, почти на 98 мас. % состоит из доломита и содержит такое же количество пирита, как и богатые руды.

Глинистые минералы представлены каолинитом и смешано-слоистыми иллит-сметитами с преобладанием иллитовых слоев, хлорит присутствует в незначительных количествах. В образце, относительно бедном по содержанию U и Mo, среди глинистых минералов существенно преобладает каолинит, тогда как в глинистой фракции богатых U и Mo руд доминируют смешанослойные иллит-сметиты, а каолинит и хлорит присутствуют как незначительная примесь.

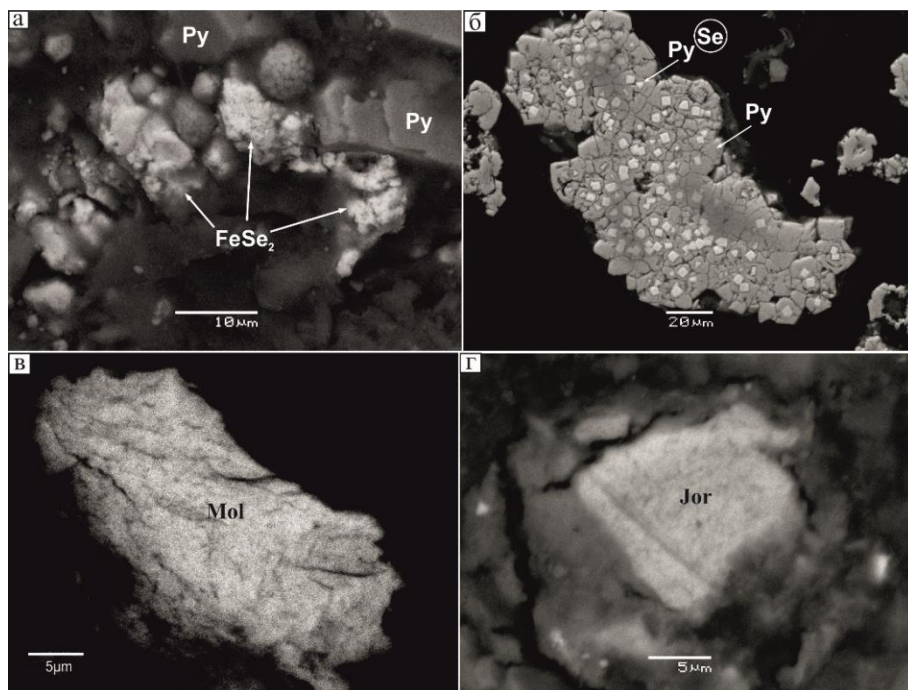


Рис 6. Минералы селена и молибдена в рудах: а - джаркенит (FeSe_2 , яркое) в ассоциации с пиритом – зерна и фрамбоид (Py, серое); б - кристаллы Se-пирита (светлое) в пиритовом агрегате (серое); в – Re-содержащий молибденит (Mol); г – крупная частица Мо-Fe-сульфида иордизита, (Jor) с примесью Re (~1.7%). BSE изображение.

Главной задачей привлечения электронной микроскопии были поиски минеральных фаз Mo, U, Re и Se. В рудах впервые здесь установлены минеральные формы нахождения **селена**; они представлены джаркенитом FeSe_2 (рис. 6а), Se-пиритом (рис. 6б) и клаусталитом PbSe .

Уран в рудных образцах месторождения был обнаружен в виде редких микронных и субмикронных включений уранинита (настурана) в пиритовой массе. Кроме того, уран часто присутствует в составе углистых частиц (предположительно сорбированный). Сорбированный уран (~1.0 мас. %) установлен в колломорфных корках, развитых по измененной поверхности зерен пирита, в них же содержится до 0.5 мас. % рения. В виде примеси уран (до 3 мас. %) присутствует в составе циркона и ксенотима. Он фиксируется также в составе оксидной Al-Fe-фосфатно-сульфатной массы, которая часто покрывает зерна рядом лежащих частиц (предположительно Al-Si состава). Эти фазы, сорбирующие уран, вероятно, представляют собой отмеченное ранее (Расулова и др., 2007) U-содержащее электроноаморфное вещество. Уран (~5.8 мас. %) был установлен также в составе редкоземельного фосфатного минерала типа рабдофана $(\text{Ca,U,REE})(\text{PO}_4)$, где REE = Ce, Nd, Dy, который встречается в тесной ассоциации с фрамбоидальным пиритом. В дополнение к ранее известным минеральным формам урана U^{4+} , была выявлена его легкоподвижная уранильная(?) форма в ореоле распространения рения (богатые Re участки); здесь же установлена минеральная ассоциация, сопутствующая повышенным содержаниям урана (пирит – микроклин – смешанослойный иллит-сметтит – гипс).

Молибден в рудах обычно представлен колломорфной Мо-сульфидной массой, с незначительно варьирующим содержанием железа, которая была нами диагностирована как иордизит – аморфный сульфид Мо с примесью Fe (~5–9 мас. %). Часто это микронные зерна с неровными краями и трещинами, напоминающими раковистый излом; редко – крупные (10-15 мкм) зерна угловатой морфологии (рис. 6г). В составе подобной массы часто присутствуют (~1.5 мас. %) элементы Re, Se, As, Zn, Co, Ni. Молибден в кристаллической форме (молибденит) был установлен в образце руды с высоким содержанием рения (рис. 6в); в составе молибденита обычно присутствует Fe (~4 мас. %).

Рений был зафиксирован нами в составе минеральных фаз молибдена, как и предполагали предыдущие исследователи (Расулова и др, 2007; Кременецкий и др, 2011; Карась и др, 2017). В поисках собственных фаз Re и Mo особое внимание было уделено образцу с максимальным содержанием Re (583 г/т), который представлен веществом углистого пропластка. Re (~1.7 мас. %) установлен в составе микронных частиц Mo(Fe)-сульфидного состава (иордзитовая масса, рис. 6г) и в частицах молибденита – до 1.3 мас. % Re (рис. 6в), где формой рения, предположительно, является изоморфное вхождение Re в кристаллическую решетку молибденита.

Генетическая модель формирования U-Mo-Re минерализации

Опираясь на выводы предыдущих исследователей U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения (Грушевой и др., 1999; Расулова и др., 2007; Карась и др., 2017), наиболее приемлемой для рассматриваемого объекта представляется комбинированная син–эпигенетическая модель образования этого месторождения палеодолинного типа. Она включает, с одной стороны, участие процессов синхронных или близких по времени к осадконакоплению и диагнезу, которые обеспечивали относительно невысокую, субпромышленную концентрацию металлов, серы и селена на геохимических барьерах. Это барьер восстановительный – за счет обилия растительного детрита; и барьер сорбционный, обусловленный наличием в осадочных слоях сапропелей, гумусового материала (основа бурых углей), глинистых отложений и гидроксидов железа. Вмещающие эту субпромышленную U ($\pm$ Mo, Re) минерализацию песчаные отложения сформировались в поймах меандрирующих небольших рек, в насыщенных растительными остатками старицах, дельтах, лиманах или в теплом мелководном море, у края холмистой суши Воронежского кристаллического массива.

С другой стороны, промышленно значимые рудные концентрации сформированы гипергенными процессами на эпигенетической стадии в результате гидрогенного минералообразования – кислородсодержащими латерально мигрирующими подземными водами в толще проницаемых песков. Помимо участия названных выше сорбционно-геохимических барьеров (прослой углей и гумусового материала), важным элементом модели становится восстановительный барьер, возникающий на фронте поднимающихся вод глубинной циркуляции. Эти воды мигрировали в фаменских известняках вверх по разломам, которые нарушают подошву песчаной толщи, и корни которых уходили в кристаллический фундамент. Значение и важный вклад этого фактора подчеркивается необычной морфологией рудной залежи со столбообразными раздувами мощности и концентрационными рудными «столбами» Mo и Re (рис. 3, 4). На форму и мощность рудных тел несомненно влиял гидродинамический фактор, который обуславливал изменения скорости фильтрации вод при пересечении многочисленных горизонтов, сложно переслаивающихся, контрастных по гранулометрии плохо- и умеренно-сортированных дельтовых и русловых осадков, мощность которых в латеральном направлении существенно менялась.

На первом этапе обломочный аркозовый и пепловый вулканомиктовый материал (в подчиненном количестве), вместе с растительным детритом выносимый временными и речными потоками в пойму, старицы и дельты, отлагался в виде литологически неоднородной терригенной толщи, неравномерно обогащенной углеродистым веществом

(рис. 7а). Обилие растительного детрита свидетельствует о гумидном климате. Теплый влажный климат способствовал развитию глубоко проникающих кор выветривания на прилегающем Воронежском выступе кристаллических пород, который сложен гранит–зеленокаменными, железисто–кремнистыми и черносланцевыми комплексами. Их выветривание высвобождало значительные количества как «гранитофильных» (U, Mo, Pb, Y, PЗЭ), так и «базитовых» (Fe, Ni, Cu, Zn, Re, Co) элементов. В поверхностные воды эти элементы поступали в виде взвешенных частиц и в растворенном виде, в основном, в виде комплексных соединений. Вместе с обломочным материалом тяжелые металлы (Fe, Cu, Ni, Zn, Pb, U, Mo, Re) накапливались в осадках. На стадиях седиментации и диагенеза растворенные элементы (включая U, Mo и Re) сорбировались органикой и, в меньшей степени, глинистыми частицами, а также оксигидроксидами Fe. В условиях окисления сульфидов (включая бактериальное) уран сорбировался на измененной поверхности пирита, в т.ч. – вместе с рением. Таким образом, в визейском веке в терригенных осадках сформировались послойно-рассеянные сорбционные скопления рудных элементов, вероятнее всего, с относительно невысокой концентрацией металлов.

Основные промышленные U-Mo-Re руды сформировались в песчаной толще *на втором, гидрогенном этапе*, когда минералообразование происходило при латеральной фильтрации по проницаемым горизонтам песков обогащенных кислородом подземных вод (рис. 7б). Этот процесс сопровождался частичным *переотложением* U, Mo, Re, Se, Cu, Ni, Zn из послойной дисперсной рудной минерализации первого этапа. Рудообразование происходило на восстановительном барьере (растительный детрит и, вероятно, дисульфиды железа), а также на сорбционном барьере (глинистые минералы). Активизация инфильтрационного рудоотложения происходила в эпоху господства аридного климата (вероятно, в триасе), когда угнетенно развитая в области питания растительность не препятствовала проникновению в подземный гидрологический бассейн вод, насыщенных кислородом. Почвенная микробиота переносилась фильтрующимися водами к растительным остаткам в песчаных толщах, обеспечивая непрерывное окисление органического вещества (сначала аэробное, а затем и анаэробное). В окислительной среде, благодаря микробной активности, происходило поверхностное изменение зерен песков, а рудные элементы сорбировались в образованных корках (продуктах преобразования). В результате жизнедеятельности аэробно–анаэробного бактериального сообщества возникала восстановительная обстановка, создавались условия для восстановления и иммобилизации рудных элементов. При этом U, Mo и Re фиксировались как в минеральной, так и, преимущественно, в сорбированной формах.

Важными факторами образования U–Mo–Re скоплений в породах осадочного чехла Русской плиты являются геоморфологический (долина Скопинской палеореки), палеогидрогеологический, седиментационно-диагенетический, а также тектонический и магматический, которые вызывали активизацию Восточно-Европейской платформы, прежде всего – позднедевонский щелочно-базальтовый вулканизм Восточно-Европейской Крупной Магматической Провинции (Пучков, 2010). Неоднократные импульсы тектогенеза обусловили подновление существующих в фундаменте разломов, обеспечив, таким образом, дренаж более глубоких частей коры (и мантии?), поступление в стратисферу глубинных флюидов.

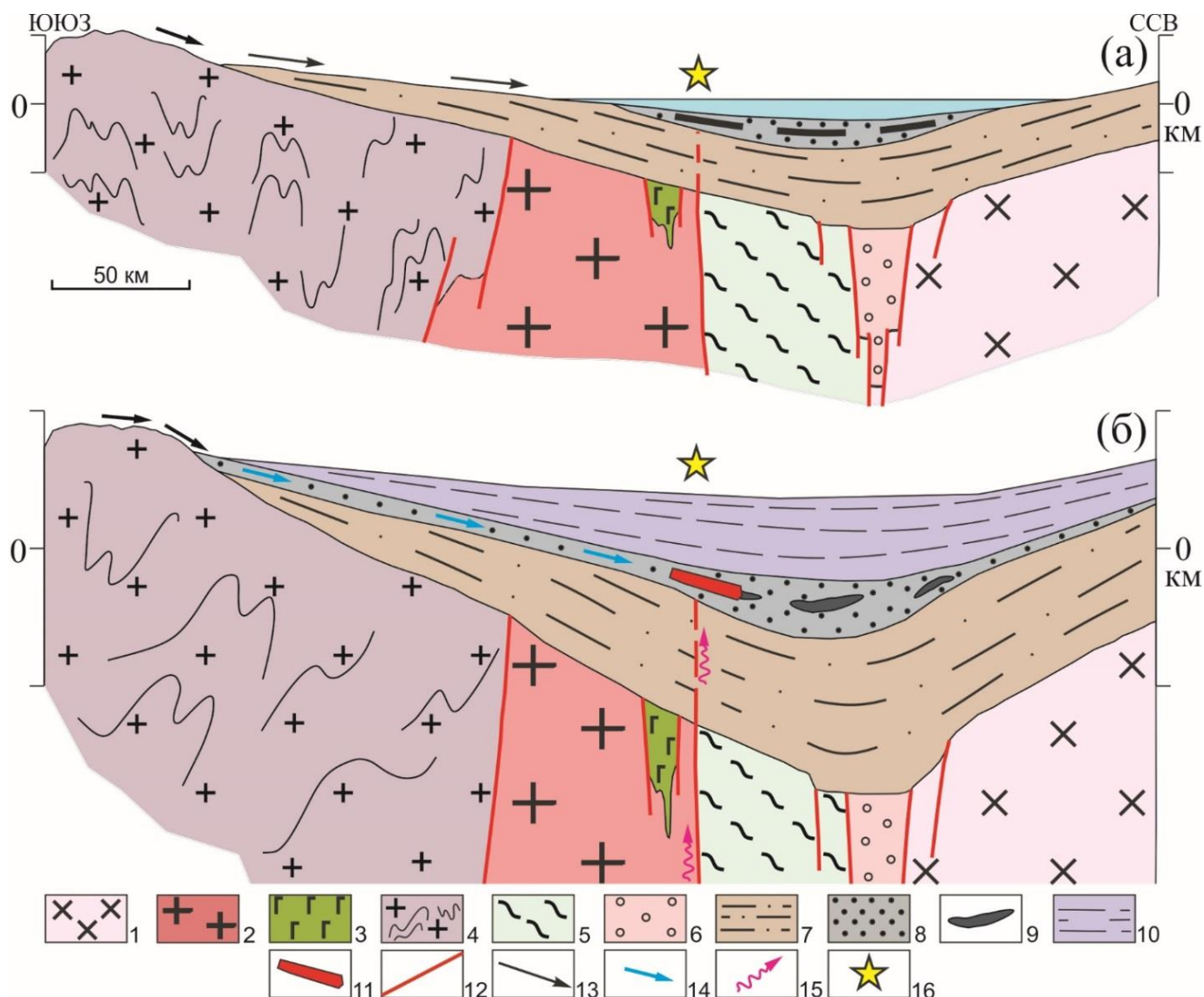


Рис. 7. Схематический разрез-палеорекострукция южной части Подмосковского бурогоугольного бассейна и позиция U-Mo-Re минерализации для среднедевизейского (а) и триасового (б) периодов. Соотношение вертикального и горизонтального масштабов 1:25 (а) и 1:50 (б). Разрез по линии аз. 15°, ССВ, в пределах месторождения соответствующей профилю III (см. рис. 2).

1, 2 – структурно-вещественные комплексы блоков с архейской континентальной корой: 1 – гранитогнейсы Волго-Уралии, 2 – плагиогнейсы, амфиболиты и мигматиты Сарматии; 3 – архейские зеленокаменные пояса; 4 – палеопротерозойские осадочно-вулканогенные комплексы внутриплитных рифтогенных структур и пассивных континентальных окраин; 5 – метаморфизованные палеопротерозойские океанические и рифтогенные осадки; 6 – рифейско-вендские осадки Пачелмского авлаогена; 7 – верхнедевонские карбонатно-терригенные отложения; 8, 9 – нижнее-среднедевизейские отложения, с пластами растительного детрита (9); 10 – триасовые отложения; 11 – U-Mo-Re руды в пластах бурых углей; 12 – разломы; 13 – направление поверхностных вод; 14 – направление окислительных напорных вод; 15 – глубинные флюиды и эксфильтрационные рассолы; 16 – примерная позиция месторождения.

Заключение

В результате проведенных исследований на гидрогенном Брикетно-Желтухинском U-Mo-Re месторождении Подмосковского буроугольного бассейна уточнены факторы локализации комплексного оруденения. Условия, способствующие образованию гидрогенных U-Mo-Re-(Se) месторождений в визейских палеодолинах Подмосковского буроугольного бассейна, представляются следующими. На первом этапе (поздний палеозой): гумидный климат в ранне-средневизейское время и густая сеть поверхностных водотоков с большим дебетом сформировали глубоко врезанные долины. Активизация блоков фундамента, древних (архейских) и молодых (протерозойских), изменила базис эрозии, обеспечив большой объем обломочного материала. Ареальный щелочно-базитовый магматизм (юго-восток ВЕП, вторая половина девона) мог служить важным дополнительным источником материала, в том числе Re, поступавшего как с продуктами вулканизма (пепловые горизонты), так и в связи с поздними фазами интрузивов (пояса даек), допуская предположение о вероятном поступлении флюидов из мантии. На втором этапе: господство аридного климата продолжалось в течение триаса. Длительный период поднятия ВЕП (триас–ранняя юра) активизировал гидродинамику подземных вод. Периоды тектонической активизации сопредельных Уральской и Альпийской складчатых областей “оживили” структуры фундамента ВЕП, что способствовало поступлению в породы осадочного чехла глубинных эксфильтрационных вод и рассолов (источники сульфатной серы), а возможно, и мантийных флюидов.

Выявлены формы нахождения основных рудных компонентов (Re, Mo, U, Se). Изучены геохимические особенности руд месторождения; уточнена их минералогическая зональность роллового типа по Re, Mo, U. Преобладание ионообменной формы главного рудного компонента рения, слабосвязанная форма урана и установленные формы молибдена (органическая и минеральная) показывают перспективность этого Re-месторождения, как объекта для промышленной разработки.

Список публикаций по теме диссертационной работы

В рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. **Кайлачаков П.Э.** Сульфидная минерализация руд уран–молибден–рениевого Брикетно–Желтухинского месторождения (Подмосковский бассейн) // Вестник РУДН. Серия: Инж. исследования. 2017. № 3. С. 353–360.
2. Викентьев И.В., **Кайлачаков П.Э.** Уникальное месторождение рения в угленосных песках карбона русской плиты. Сообщение 1. Геологическое строение // Литология и полезн. ископаемые. 2020. № 3. С. 209–226.
3. **Кайлачаков П.Э.**, Дойникова О.А., Белоусов П.Е., Викентьев И.В. Уникальное месторождение рения в угленосных песках карбона русской плиты. Сообщение 2. Минералогия руд // Литология и полезн. ископаемые. 2020. № 4. С. 337–370.
4. Афонин А.А., Бурмистров Ю.М., Викентьев И.В., Зуев С.В., **Кайлачаков П.Э.**, Конобеевский Е.С., Мордовской М.В., Пономарев В.Н., Солодухов Г.В. Изучение возможности нейтронно-активационного определения содержания рения в радиоактивных породах // Изв. РАН. Серия физическая, 2021. Т. 85. №10. С. 1374–1380.

В других изданиях:

1. Карась С.А., Культин Ю.В., Кременецкий А.А., Орлов С.Ю., Шлычкова Т.Б., **Кайлачаков П.Э.** Новый геолого-промышленный тип гидrogenных рениевых месторождений: геологическое строение и технология подземного выщелачивания // Рений, вольфрам, молибден – 2016. Научные исследования, технологические разработки, промышленное применение. Сб. мат. межд. научно-практ. конф. М.: Гинцветмет, 2016. С. 78–82.
2. **Кайлачаков П.Э.** Особенности геологического строения редкометального Брикетно-Желтухинского месторождения // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. Сб. мат. XXIX межд. научно-практ. конф., Новосибирск, 2016. № 29. С. 24-29.
3. **Кайлачаков П.Э.** Геологическое строение и минеральный состав руд Брикетно-Желтухинского месторождения рения // VII научно-практ. школа-конф. молодых ученых и специалистов с межд. участием «Геология, поиски и комплексная оценка месторождений твердых полезных ископаемых». М.: ВИМС, 2017. С. 48-49.
4. **Кайлачаков П.Э.** Геохимическая зональность уран-молибден-рениевого Брикетно-Желтухинского месторождения (Подмосковный бассейн) // VII Рос. молодежная научно-практ. школа «Новое в познании процессов рудообразования». М.: ИГЕМ РАН, 2017. С. 149-150.
5. **Кайлачаков П.Э.** Геолого-структурные условия локализации U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения (Подмосковный бассейн) // Мат. Всерос. конф. к 120-летию акад. А.Г. Бетехтина «Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: новые горизонты». М.: ИГЕМ РАН, 2017. С. 426-429.
6. **Кайлачаков П.Э.** Особенности сульфидной минерализации и условия рудообразования на Брикетно-Желтухинском месторождении (Подмосковный бассейн) // VII Всерос. студ. научно-практ. конф. с межд. участием «От учебного задания – к научному поиску, от реферата – к открытию». ХГУ им. Н.Ф. Катанова, г. Абакан, 2018. С. 246-248.
7. **Кайлачаков П.Э.** Характеристика продуктивной (U-Mo-Re) части разреза бобриковского горизонта Подмосковного бурогоугольного бассейна // IX Рос. молодежная научно-практ. школа с межд. участием «Новое в познании процессов рудообразования». М.: ИГЕМ РАН, 2019. С. 170-173.
8. Афонин А.А., Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Солодухов Г.В., Мордовской М.В., **Кайлачаков П.Э.**, Пономарев В.Н., Бурмистров Ю.М. Изучение возможности нейтронно-активационного определения содержания рения в радиоактивных породах // 63-я научная конференция МФТИ. Долгопрудный, 2020. 1 с.
9. Zuyev S.V., Afonin A.A., Konobeevsky E.S., Solodukhov G.V., Mordovskoy M.V., **Kailachakov P.E.**, Ponomarev V.N., Burmistrov Yu.M. Studying a possibility of neutron-activate determination of rhenium content in radioactive rocks // LXX International conference «NUCLEUS-2020». Saint Petersburg. 2020. P. 123-124.
10. **Кайлачаков П.Э.** Новые данные по минералогии руд U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения (Подмосковный бассейн) // X Рос. молод. научно-практ. Школа «Новое в познании процессов рудообразования». М.: ИГЕМ РАН, 2021. С. 124-126.