

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ»  
ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ**  
*Департамент недропользования и нефтегазового дела*

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и  
геохимии Российской академии наук**

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 твердых полезных  
ископаемых, минерагения

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
**на соискание ученой степени**  
**кандидата геолого-минералогических наук**

Научный руководитель: д. г.-м. н.,  
профессор И.В. Викентьев  
Научный консультант:  
д. г.-м. н. О.А. Дойникова

Москва - 2021

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

1. BSE – back-scanning electron (обратно-рассеянные электроны)
2. ICP-MS – масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой
3. XRF – X-ray fluorescence (рентгенофлуоресцентный анализ)
4. ИГЕМ РАН – Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук
5. ИМГРЭ – Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов
6. ВИМС – Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского
7. ВСЕГЕИ – Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского
8. РУДН – Российский университет дружбы народов
9. ИЯИ РАН – Институт ядерных исследований Российской академии наук
10. МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии
11. ГРМ – Геология рудных месторождений
12. РФФИ – Российский фонд фундаментальных исследований
13. РФ – Российский научный фонд
14. ВЕП – Восточно–Европейская платформа
15. АСЭМ – аналитическая сканирующая электронная микроскопия
16. ГКЗ – государственная комиссия по запасам полезных ископаемых
17. РЗЭ – редкоземельные элементы
18. СПВ – скважинное подземное выщелачивание

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА I. ИЗУЧЕННОСТЬ СКОПИНСКОГО РАЙОНА	15
1.1. Геологическая изученность	15
1.2. Гидрогеологическая изученность	18
1.3. Геохимическая изученность	19
ГЛАВА II. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РУДНОГО РАЙОНА	21
2.1. Тектоника	21
2.2. Стратиграфия	22
2.3. Геологическое строение	24
2.4. Полезные ископаемые	26
ГЛАВА III. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ U-Mo-Re БРИКЕТНО-ЖЕЛТУХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ	27
3.1. Геолого-тектоническая позиция U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения	27
3.2. Геологическое строение месторождения и литологическая характеристика слагающих его пород	29
3.2.1. Краткая характеристика карбонатных пород низов разреза	32
3.2.2. Характеристика рудовмещающей песчаной толщи	37
3.3. Характеристика рудных тел Брикетно-Желтухинского месторождения	43
ГЛАВА IV. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РУД	55
4.1. Геохимические исследования руд месторождения	55
4.2. Статистическая обработка результатов опробования руд месторождения	60
4.3. Зональность Re, Mo, U, (Se) роллового типа	68
4.4. Эксперименты по последовательному выщелачиванию основных компонентов руд месторождения	75
ГЛАВА V. МИНЕРАЛОГИЯ РУД U-Mo-Re БРИКЕТНО-ЖЕЛТУХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ	79
5.1. Ранее выполненные работы (краткий обзор)	79
5.2. Минералогия руд	80
5.2.1. Акцессорные минералы	81
5.2.2. Глинистые минералы руд и результаты рентгенодифракционного анализа	84
5.2.3. Минеральные фазы U, Mo, Se, Re в рудах месторождения	85
5.3. Выводы по минералогии руд	99
ГЛАВА VI. ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РУДООБРАЗОВАНИЯ	105
6.1. Предварительные замечания	105
6.2. Существующие взгляды на генезис и возраст оруденения	107
6.3. Факторы формирования U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения	108
6.4. О физико-химических условиях минералов U, Mo, Re, Se	113
6.5. Син-эпигенетическая модель образования Брикетно-Желтухинского месторождения	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	129

## ВВЕДЕНИЕ

Рений – редчайший рассеянный элемент в Земной коре (кларк Re = 1 мг/т). В СССР добыча рения производилась в Казахстане из медистых песчаников Джекказганского месторождения, а также в Узбекистане и Армении – на медно–молибден–порфировых месторождениях (Иванов и др., 1969; Бурденкова, 2002). 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 (Бортников и др., 2016).

Мировое потребление Re резко увеличилось с середины 2000 гг., что вызвано ростом его использования в новых высокотехнологичных отраслях промышленности (Мелентьев, 2020). Основным источником мирового производства Re являются Cu-Mo руды медно-порфировых месторождений; в них содержание Re ~0.01-0.04 г/т, редко достигая 0.08-0.17 г/т (Грабежев, 2013). Крупнейшие мировые запасы рения находятся в Чили (Чукикамата, Эль-Теньенте), США (Бингхем, Бьют), Канаде (Айленд-Коппер, Хайленд-Велли), Казахстане (Коунрад, Джазказган, Актогай, Коксай). Мировым лидером по запасам и добыче рения является Чили (53% от мирового производства) (Кременецкий и др., 2011). Подобных месторождений в РФ крайне мало; и даже в отдаленной перспективе на тех из них, что вводятся в отработку, получение рения маловероятно. На единичных эксплуатируемых в России месторождениях порфирового и скарново-порфирового типов молибденовые концентраты (в основном накапливающие Re) не добываются.

Установленные в 1992 г. повышенные концентрации Re в фумаролах вулкана Кудрявый на о. Итуруп (Южно-Курильские острова), привели к открытию в России уникального месторождения рения, не имеющего мировых аналогов. Здесь рений представлен собственным минералом рениитом  $ReS_2$ . Он встречается в зоне высокотемпературных парогазовых фумарол действующего вулкана, источником рассматриваются глубинные флюиды (Знаменский, 2005). Запасы рения в виде рениита оцениваются в 10-15 т., в виде вулканических газов – до 20 т. в год (Кременецкий, Белоконева, 2000), что сближает Россию со странами-лидерами по природным запасам рения. Погодные условия Итурупа (тайфуны) и активность

вулкана тормозят проведение полномасштабных геологоразведочных работ; не отработаны технологические решения добычи; идет переоценка прогнозных ресурсов (Кременецкий и др., 2011). Уникальность месторождения оставляет перспективы его освоения и эксплуатации.

Современная оценка минерально-сырьевой базы Re на территории Российской Федерации показала, что в России наибольший ресурсный потенциал (3/4 от суммарного) составляют месторождения инфильтрационно-полиметалльного типа. Потенциал Подмосковной провинции, куда относится изучаемое Брикетно–Желтухинское месторождение, составляет ~80% от ресурсов Re указанного типа (Басков и др., 1993; Трач, Бескин, 2011). Такие объекты отвечают, по классификации МАГАТЭ, гидрогенным месторождениям урана песчаникового типа (Гидрогенные ..., 1980; Машковцев и др., 2017; Wülser et al., 2011) или представлены их палеодолинным (Южно-Техасским) подтипом (Халезов и др., 2009; Hall et al., 2017). На них рений добывается как сопутствующий урану компонент; для извлечения используется метод скважинного подземного выщелачивания (СПВ) (Культин и др., 2007), который обеспечивает более половины мировой добычи урана (In situ ..., 2017; Машковцев и др., 2017), доля его с годами растет.

В ходе оценочных на Re, Mo и U работ ИМГРЭ (с участием автора) 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 рениеносность была впервые установлена ФГУП «Урангео» в 2005 г. Месторождение приурочено к горизонтам углей, залегающих в слабо литифицированных песках (Карась и др., 2016; Спиридонов и др., 2016; Левченко и др., 2019). Оно рассматривается в качестве наиболее перспективного объекта промышленной разработки. Запасы месторождения утверждены ГКЗ и составляют 23 т Re по категории С<sub>2</sub>.

**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 (АСЭМ) 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, магматического) и локальных (геолого-структурного, литологического);
- 2) изучение геохимических особенностей руд месторождения;
- 3) уточнение минералого-геохимической зональности по U, Mo, Re, Se в разрезе месторождения;
- 4) исследование минерального состава руд месторождения;
- 5) выявление форм нахождения основных компонентов (U, Mo, Se, Re) в рудах;
- 6) реконструкция последовательности и механизмов рудообразования.

**Исходные материалы, 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. Предметом исследований служат результаты структурно-геологических построений (карт, литолого-геохимических разрезов и т.д.), рудно-минералогических и геохимических исследований 2016–2021 гг., выполненных автором в ИГЕМ РАН. Для подготовки иллюстраций (геологических колонок, карт и разрезов, бинарных и др. графиков) применялись компьютерные программы CorelDraw GraphicsSuite, Surfer, ArcGIS, Micromine.

Для геохимических исследований использовалась база данных (около 2900 проб), собранная при участии автора во время работы в ИМГРЭ в 2013–2015 гг. Были учтены также результаты минералогических исследований, выполненных в эти годы в ИМГРЭ, а также – в ВИМСе (Расулова и др., 2007) и ВСЕГЕИ (Енгальчев, 2019). Основные методы исследования химического состава пород и руд: рентгено-флуоресцентный анализ (XRF, аналитик Набелкин О.А.), масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, аналитик Пичугин И.А.). Редкие и

рассеянные элементы определены методом ICP-MS; в рассмотрение были включены: Re, Mo, U, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Ag, Cd, Sb, Tl, Pb, Bi, Th, Mn. Количественный химический (кинетический) анализ содержания рения в горных породах и рудах выполнен фотометрическим методом (аналитик Лебедева Г.Г.). Методика основана на каталитическом действии рения на реакцию, протекающую между теллуридом натрия и хлористым оловом. Эта методика аттестована по ГОСТ 8.563-2009 и ОСТ 41-08-205-04. Масса анализируемой пробы, полученной при растирании образца до пудры составляла 0.5–2 г. Методика позволяет определять содержания рения от 0.002 до 200 г/т в горных породах и сульфидных рудах (Кременецкий и др., 2011).

Все образцы и пробы были отобраны из керна скважин; это – серый песок с сульфидными стяжениями и углистым материалом (темно-серый до черного). Вследствие рыхлости и сыпучести образцов, а также тонкой дисперсности рудной составляющей изучение минерального состава руд проведено методами сканирующей АСЭМ. Объектами исследования выбирались преимущественно богатые рудные образцы. Чаще изучались минеральные зерна тяжелой фракции. Наиболее детально была изучена гранулометрическая фракция рудоносных песков размерностью 0.25–0.1 мм. Из слабоэлектромагнитной фракции исходных песков с помощью тяжелых жидкостей были выделены сульфиды и другие минералы с высокой плотностью, из легкой фракции – частички угля. Из выделенных фракций препараты для АСЭМ-исследований готовились путем нанесения отдельных зерен или порций порошка на проводящий углеродный скотч или на брикеты эпоксидной смолы и дальнейшей горячей запрессовки. Оба типа препаратов напылялись углем для создания проводящей пленки. Оборудование: аналитический сканирующий электронный микроскоп JSM-5610, оснащенный системой энергодисперсионного микроанализа INCA-450 и спектрометром AztecOne.

Методами рентгенофазового анализа был определен минеральный состав богатых рением руд с заметной примесью глинисто-алевритового материала, состав оруденелых доломитов, а также руд из участка месторождения, наиболее богатого на Re, U и Mo (аналитик Закусин С.В., ИГЕМ РАН). Дифракционные картины порошковых проб были получены на дифрактометре ULTIMA-IV, Rigaku, Япония; рабочий режим – 40 кВ, 40 мА, Cu излучение, Ni фильтр, диапазон 3–65°2 $\theta$  с шагом

0.02°2 $\theta$ ; полупроводниковый детектор нового поколения – DTex/Ultra, скорость сканирования 5°2 $\theta$ /минуту. Анализ результатов проводился по методике (Moore, Reynolds, 1999). Количественный минералогический анализ выполнен методом Ритвельда, программный пакет PROFEX GUI для BGMN. Расчет соотношений глинистых минералов в тонких фракциях (<2 мкм) проводился методом математического моделирования рентгеновских дифракционных картин, полученных от ориентированных препаратов в воздушно-сухом и насыщенном этиленгликолем состояниях; использован программный пакет Sybilla (Sevron).

С целью определения форм нахождения урана, молибдена и рения проведены эксперименты по последовательному выщелачиванию (десорбции) этих элементов из рудных проб с использованием модифицированной схемы Тессьера (Tessier et al., 1979; Андрющенко и др., 2017). Навеска образца (г) последовательно, в 4 этапа, обрабатывалась различными растворами, с определением количеств десорбированного урана и других металлов после каждого этапа. Каждый эксперимент проводился в течение 2 часов, соотношение твердое : жидкое = 1 : 20. На первом этапе исследуемая проба промывалась дистиллированной водой, что позволило выделить слабосвязанные металлы, сорбированные на поверхности минеральных и органических фаз за счет физической (электростатической) адсорбции, либо находящиеся в форме растворимых солей. На втором этапе образец промывался 1М раствором MgCl<sub>2</sub>, для определения катионов металлов, сорбированных по механизму ионного обмена. На третьей стадии проводилась обработка 33% раствором перекиси водорода для высвобождения катионов, связанных с органическим веществом и биопленками. В связи с высоким содержанием органики в исследованных образцах, обработка H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> проводилась повторно, вплоть до полного растворения органического вещества. На последнем, четвертом, этапе проводилась обработка образцов 10М раствором HCl для выделения прочносвязанных соединений Re, Mo и U, например, находящихся в кристаллической решетке глинистых минералов или сульфидов и сульфатов. После проведения 4 стадий десорбции, оставшийся образец (т.е. нерастворимый остаток) анализировался для определения содержания в нем металлов и металлоидов (неизвлекаемая форма) (Кайлачаков и др., 2020).

Состав и содержание богатых рудных проб Брикетно-Желтухинского U-Mo-Re месторождения определялись так же с помощью нейтронно-активационного анализа, для отработки методики измерения содержаний рения данным методом (предел обнаружения Re от 0.1 г/т). Образцы пород облучались потоками нейтронов фотонейтронного W-Be-источника ИН-ЛУЭ ИЯИ РАН на базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5. Измерения активности образцов проводились с использованием низкофонового гамма-спектрометра (Андреев и др., 2013, 2017), оснащенного детектором из особо чистого германия, в низкофоновой камере с «пассивной» защитой. Образцы массой ~2 г. активировались потоком тепловых нейтронов ~10<sup>7</sup> нейтрон/см<sup>2</sup>·с в течение ~1–3 ч и выдерживались перед измерением 10–30 мин. Время измерения активационных  $\gamma$ -спектров составляло ~20–44 ч. В качестве образцов сравнения одновременно с пробами облучались образцы чистого рения массой 0.1–0.25 г. Набор активационных спектров осуществлялся с помощью программы SpectraLineGP в режиме последовательной записи спектров на диск компьютера каждые 100 с. Использование такого спектрометра позволяет проводить сравнительные измерения гамма-спектров естественной радиоактивности образцов и их активационных спектров (Zuyev et al., 2020, Афонин и др., 2020; Афонин и др., 2021).

#### **Научная новизна.**

1) Уточнена рудовмещающая структура месторождения представленная куполовидными **морфоструктурами**. Прогибы подошвы песчаной (бобриковской) толщи совмещаются в плане с «гребнями» воздымания её кровли, формируя своеобразные структуры, связанные с раздувами мощности. Предполагается, что данные куполовидные структуры имеют гидротермально-гидравлическую природу; с ними связано появление **концентрационных рудных столбов**;

2) установлена ролловая структура рудной залежи с «головной» частью ориентированную на север;

3) установлены главные **формы рения**: а) связанная с органическим детритом и б) минеральная – в виде изоморфного вхождения его в состав молибденита;

4) 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;

5) экспериментами по десорбции **U, Mo, Re** для богатых руд месторождения установлены формы нахождения рудных элементов: а) более половины **рения** (56%) связано с углистой массой, около 30% – в ионообменной форме (глинистый и органический материал), 13% – слабосвязанная; б) **молибден** в равных долях распределен между органической и минеральной формой; в) **уран** в богатых Re участках находится преимущественно в слабосвязанной форме, легко мигрирует с водными растворами;

б) установлена минеральная форма молибдена: преимущественно **Re-содержащий иордизит** (~1.7 мас. % Re), реже кристаллический **Re-содержащий молибденит** (~1.3 мас. % Re);

7) впервые в рудах месторождения установлена минеральная форма селена – **джаркениит** ( $\text{FeSe}_2$ ); изучены различные **морфологические типы пирита**: кристаллы и зернистые массы, фрамбоиды, трубчато-волоконистые псевдоморфозы по ископаемой древесине.

### **Практическая значимость работы.**

Брикетно-Желтухинское месторождение выделяется среди окружающих его рудных объектов Подмосковского бурогоугольного бассейна необычным, комплексным составом руд с промышленными содержаниями рения  $>1.0$  г/т, поэтому исследование данного объекта важно с практической точки зрения.

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  $C_{\text{орг}}$ , учитывая высокую подвижность элемента в лабораторных условиях. Это заключение позволяет рекомендовать применение метода в практике геологоразведочных работ на Re.

### Защищаемые положения.

*Положение 1.* В субгоризонтально залегающей рудовмещающей песчаной толще (бобриковский горизонт, виле) 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.

*Положение 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.

*Положение 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 джаркенимом FeSe<sub>2</sub>;
- уран – установлен в составе аксессуарных минералов: циркон, ксенотим, монацит и РЗЭ-фосфат (3–6 мас. % U); встречается оксид урана (~1 мкм) в пирите.

**Апробация работы.** С 2016 по 2021 гг. исследования автора проводились в ИГЕМ РАН в рамках темы базового задания лаборатории геологии рудных месторождений и вошли в соответствующие годовые отчеты. В 2019 г. поддержан авторский двухлетний проект РФФИ № 19-35-90095\_Аспиранты в Департаменте недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН. Со второй половины 2020 г. исследования вошли в проект Минобрнауки РФ № 075-15-2020-802.

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). Тезисы опубликованы в материалах 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).

По результатам исследований опубликовано 14 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, из них 3 – в изданиях, индексируемых Web of Science и SCOPUS.

**Личный вклад автора** состоит в непосредственном участии во всех этапах исследования. Автор участвовал в работах (2013-2015 гг.) и составлении отчета с подсчетом запасов на Re и попутные компоненты для U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения. Работая в ИМГРЭ, автор активно участвовал в детальной геологической и фото-документации керна, проводил радиометрические измерения керна (радиометр ДСК-96), а также проводил экспресс-анализ керновых проб на U, Mo и др. элементы в полевых условиях с помощью портативного рентгено-флуоресцентного анализатора ХМЕТ-7500. Из всего объема бурения (2464 пог. м.) на стадии детальной разведки месторождения (2013-2015 гг.) под руководством Орлова С.Ю. (ИМГРЭ) автором было задокументировано 2414.35 пог. м. керна; самостоятельно задокументирован 171 пог. м. керна. Автор проводил опробование рудовмещающей песчаной толщи, принимал непосредственное участие в составлении и оформлении геолого-геохимических колонок (35 колонок скважин масштаба 1:200, 33 колонки скважин масштаба 1:50), геологической карты месторождения масштаба 1:50 000, плана участка месторождения масштаба 1:5000; участвовал в оформлении 2 геологических разрезов через северную и южную части

месторождения (масштаб вертикальный 1:100; горизонтальный 1:500); в 2020 г. самостоятельно составил продольный разрез через центральную часть месторождения.

В период 2016-2021 гг. автор собрал и проанализировал фондовую и опубликованную литературу по геологическому строению изучаемой и сопряженных территорий; проанализировал регионально-тектонические факторы размещения месторождения; провел уточнение фрагментов ряда геологических колонок и разрезов месторождения; выполнил минералогические исследования руд; провел математическую обработку геохимических данных (около 2900 проб) и выполнил интерпретацию результатов; готовил монтированные и насыпные препараты для зонда, получил микрофотографии сульфидов и других минералов руд под электронным микроскопом; принимал участие в интерпретации результатов рентгенофазового анализа проб руд; провел эксперименты по последовательному выщелачиванию (десорбции) U, Mo, Re из рудных проб (под рук. Белоусова П.Е.).

**Структура и объем работы.** Данная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, включающего 145 наименований, содержит 143 страницы, 46 иллюстраций и 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 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; помогли в работе к.г.-м.н. Белоусов П.Е., к.г.-м.н. Иванова Ю.Н., Выхристенко Р.И. и Спирина А.В. Автор выражает благодарность д.г.-м.н. Кременецкому А.А., Карасю С.А., Орлову С.Ю., Шлычковой Т.Б. за организацию полевых работ и помощь в освоении навыков геологической документации керна; особая признательность – руководству ФГУП «ИМГРЭ» за предоставление каменного материала для прецизионных исследований. Автор благодарен Смирнову Д.И., Смирновой Н.С., д.г.-м.н. Бескину С.М., к.г.-м.н. Максимюк И.Е. за всестороннюю поддержку, советы и помощь на всех этапах работы. 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., и ИГЕМ РАН: Якушеву А.И., Закусину С.В., Никольскому М.С. Автор благодарен сотрудникам ИЯИ РАН: к.ф.-м.н. Зуеву С.В. и Афонину А.А. за проявленный интерес и помощь в выполнении ядерно-физических исследований. 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. им. В.М. Крейтера (МПИ и их разведки); за конструктивную критику диссертации – профессора, д. г.-м.н. Георгиевского А.Ф.

## ГЛАВА I. ИЗУЧЕННОСТЬ СКОПИНСКОГО РАЙОНА

Ураноносность Скопинского района была выявлена в середине 50-х годов прошлого столетия при радиометрической ревизии керна скважин и горных выработок угольных месторождений Московского бассейна (Мосбасса). За более чем пятидесятилетний период геологического изучения Скопинского района было выявлено значительное количество урановорудных объектов. Рудопроявления и около 40 аномалий урана приурочены в основном к тульско-бобриковским терригенно-угленосным отложениям нижнего карбона. Они приурочены к породам практически всего разреза, изученного радиометрически от добобриковского известнякового фундамента до современных четвертичных отложений.

Брикетно-Желтухинское рудное поле включает несколько урановорудных участков и проявлений: Вослебовское, Южно-Скопинское, Восточно-Вердинское, Вязовенковское и Поплевинское. Рудное поле имеет протяженность около 40 км в субширотном (восток – северо-восток) направлении при ширине – 20-25 км.

### 1.1. Геологическая изученность

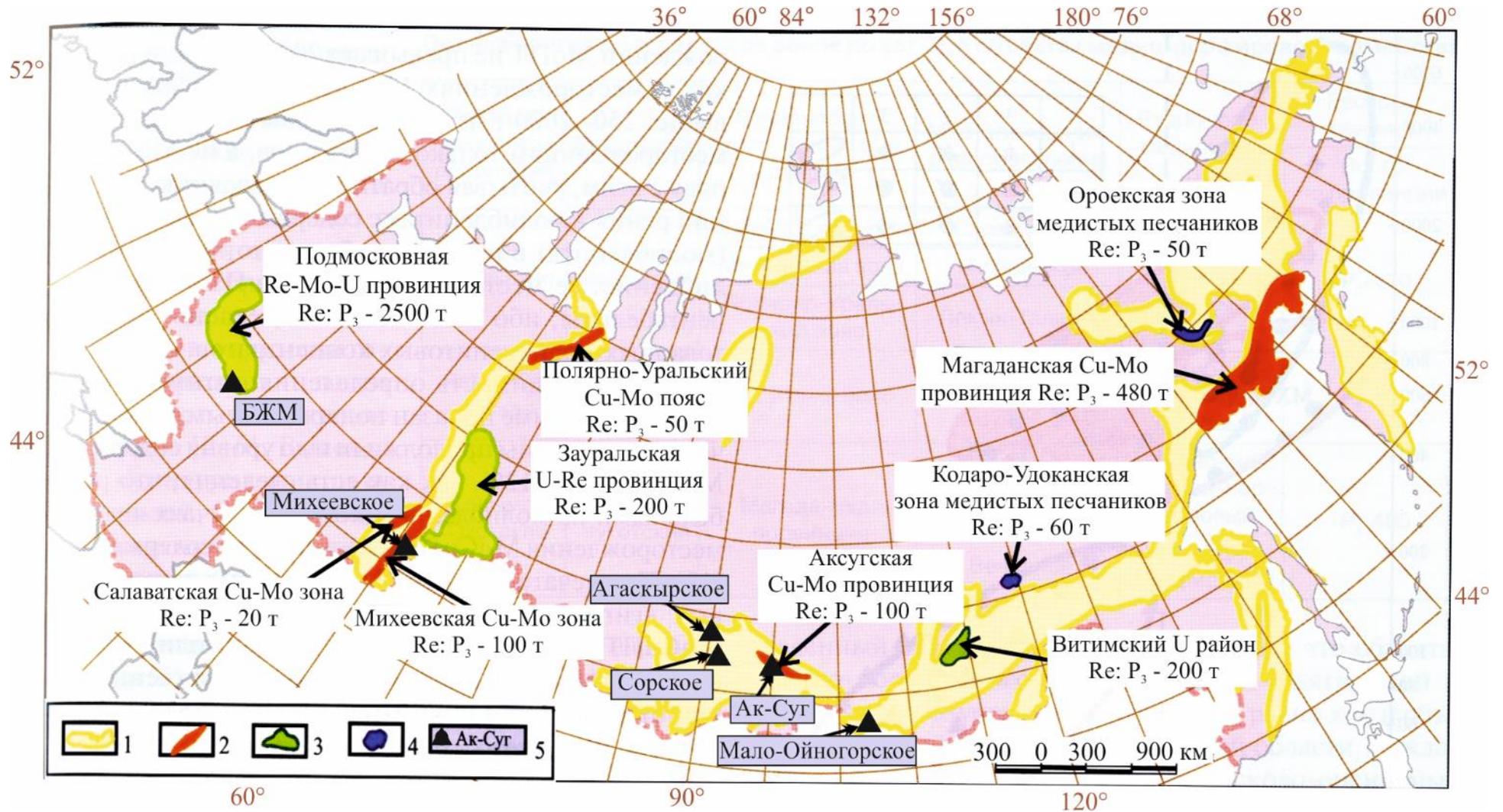
В довоенный период проводились интенсивные геологические изыскания на уголь с большим объемом бурения, и в 1939 г. была закончена десятиверстная геологическая съемка, включающая лист N-37-XXII. В 1963 г. по обобщенным материалам геологических съемок 1:200000, 1:100000 и 1:50000 поисково-оценочных работ на уголь составлена геологическая карта 1:200000 дочетвертичных отложений по данным Горловской картировочной скважины (Ергаков и др, 1962ф) и 20 новым скважинам (Урусбиева и др, 1963ф). В 1968 г. издана Государственная геологическая карта м-ба 1:200000 с объяснительной запиской (Государственная ..., 1968). В 70-е г. выполнено доизучение территории листа N-37-XXII (Ковалев и др, 1976ф).

В начале 1950-х г. Мосбассуглеразведкой проводились поисковые работы на Брикетно-Желтухинском участке, в ходе которых были составлены геологические карта 1:25000 и разрезы (Булахов, 1952ф). В 1955-58 гг. площадь изучалась Кировской экспедицией 1-го Главного геологоразведочного управления Мингео СССР (Олейник и др, 1956ф); разведка уранового Брикетно-Желтухинского месторождения была выполнена по сети 100×100 м на площади около 3 км<sup>2</sup>. По условиям для горного способа отработки было оконтурено 17 рудных тел и

выделено 47 одиночных рудных пересечений. Наряду с ураном, в контуре рудных тел в промышленных концентрациях был установлен молибден. Из-за низкого качества руд, небольших запасов и сложных горно-геологических условий месторождение было признано непромышленным.

В конце 90-х годов, в связи с пересмотром перспектив Русской платформы на ураноносность – для отработки способом скважинного подземного выщелачивания (СПВ) – была заново пересмотрена интерпретация материалов Кировской экспедиции, и оценены запасы и ресурсы урана в высокопроницаемых породах месторождения (Фоменко, 1999). Работами ФГУГП «Урангео» была выполнена эманационная съемка по профилям с шагом 200 м, измерена альфа-активность поверхности. Были изучены радиометрические свойства пород месторождения (Новгородцев и др., 2005ф). В 1997-2005 гг. специалистами Горно-геологической экспедиции этого предприятия здесь проводились поисково-оценочные и детализационные работы, по результатам которых была дана положительная оценка перспектив отработки этого месторождения методом СПВ (Культин и др., 2007). Двумя буровыми профилями было вскрыто уран-молибден-ренийевое оруденение. Было решено, что месторождение нерентабельно на добычу урана. Мощность рениевой минерализации значительно превышала мощности урановых тел; прогнозные ресурсы рения оценены в количестве 40 т по категории  $P_1$  и 300 т по категории  $P_2$ .

В 2009 г. в ходе работ по изучению минерально-сырьевой базы рения в России были собраны и обобщены данные, в частности, по месторождениям инфильтрационно-полиметального типа (Трач, Бескин, 2011). Был отмечен высокий потенциал рениевого оруденения этого типа в палеодолинах Подмосковной провинции, которое оценивается в 2500 т по категории  $P_3$  (Рис.1.1). Брикетно-Желтухинское месторождение было рекомендовано для постановки прогнозно-поисковых работ первой очереди.



**Рис. 1.1.** Прогнозная карта рениености территории России по (Трач, Бескин, 2011).

1–4 – перспективные рениеносные площади: 1–2 – с оруденением медно-порфирового семейства: 1 – мегапояса, 2 – провинции и рудные районы; 3 – пояса с оруденением инфильтрационно-полиметального типа; 4 – провинции медистых песчаников; 5 – месторождения с уточненными запасами рения, поставленными на Государственный баланс.

## 1.2. Гидрогеологическая изученность

В Скопинском районе проведено радиогидрохимическое опробование наземных водопунктов и различных водоносных горизонтов – от верхнедевонского до верхнечетвертичных в масштабе 1:1000000-1:500000; в масштабе 1:200000 и в масштабе 1:100000-1:25000. В масштабе 1:200000 выяснены региональные условия питания, движения и разгрузки подземных вод основных водоносных горизонтов (в т.ч. и перспективных на уран бобриковского и тульского). В области выхода на поверхность бобриковских и тульских отложений выявлено большое количество радиогидрогеологических аномалий преимущественно урановой природы (уран до  $10^{-23} \cdot 10^{-5}\%$ , радон до 65-94 эман), а на севере района - преимущественно радоновой (уран до  $6,5 \cdot 10^{-5}\%$ , радон – до 308 эман) (Новгородцев и др., 2005ф). Природа большей части аномалий осталась не выясненной.

Гидрогеохимические исследования, выполненные в период 2002-2005 гг. Горно-геологической экспедицией ФГУП «Урангео» в районе Брикетно-Желтухинского месторождения, показали, что, в основном, для вод бобриково-тульских отложений характерны пресные воды преимущественно гидрокарбонатно-кальциевого или гидрокарбонатно-кальциево-натриевого состава (Новгородцев и др., 2005ф). Абсолютные отметки уровней подземных вод достигают 135-136 м. Глубина залегания уровня подземных вод находится в интервале 14-16 м.

Движение вод всех горизонтов направлено на север, в сторону долины реки Моша, где частично происходит их разгрузка, а большая часть вод продолжает двигаться под долиной р. Моши в сторону долины р. Ранова, т.е. на восток. Коэффициент фильтрации рудовмещающих отложений колеблется в интервале 0,9-19 м/сут. Рудные тела сосредоточены в бобриковско-тульском водоносном горизонте мощностью 35-40 м, который подстилается глинисто-карбонатным водоупором  $D_3-C_1$  возраста и перекрывается морскими песчано-глинистыми отложениями мезо-кайнозоя мощностью 20-50 м (Новгородцев и др., 2005ф). Региональное движение подземных вод имеет северо-восточное направление. Восстановительная сероводородная обстановка в бобриковско-тульских отложениях способствует сохранности Брикетно-Желтухинского месторождения.

### 1.3. Геохимическая изученность

В 2001 году – закончены исследования по районированию Русской платформы, по результатам работ была составлена карта районирования осадочного чехла центральной части Русской платформы по степени перспективности на рудные полезные ископаемые масштаба 1:250000, а также прогнозно-геохимическая карта на площадь Скопинского района масштаба 1:100000 (Овчинников и др., 2001ф).

В 2000-2001 гг. Центральной геологической экспедицией «Урангео», на отрезке Скопинского палеоруслы от Брикетно-Желтухинского месторождения до широты г. Рязани проведено литогеохимическое опробование по вторичным ореолам рассеяния (Новгородцев и др., 2005ф). По керну поисковых скважин, кроме кернового опробования рудных интервалов, было проведено геохимическое опробование с определением содержаний 42 элементов полуколичественным спектральным анализом повышенной чувствительности. Затем почти все пробы были проанализированы количественным спектральным анализом повышенной чувствительности на Re с чувствительностью 0,3-0,5 г/т. Полученные результаты геохимического опробования вместе с данными кернового опробования собраны в геохимические базы данных.

Математическая обработка данных проводилась с использованием многомерного статистического анализа методом главных компонент по наиболее продуктивному разрезу. Было построены два разреза: 1) совмещенный для урановорудных тел, молибденовых ореолов и значений 1-й главной компоненты [(V (0,81), Co (0,94), Ni (0,88), Mo (0,86), Re (0,84), Tl (0,87), U (0,74), и C<sub>орг</sub> (0,82) при Si (-0,72)]; 2) совмещенный для ореолов рения и значений 2-й главной компоненты [Re (0,73), Ni (0,76), Co (0,82), Mo (0,68), Zr (0,58), Cu (0,67), Zn (0,75), при Si (-0,91)].

По результатам факторного анализа (Новгородцев и др., 2005ф) выделены две группы элементов:

- 1) V, Zr, Ti, Fe<sup>+2</sup>(S-2), Fe<sup>+3</sup>(Fe), Pb, Se, Si, Mn, Mo – в большей степени ассоциирующих с U.
- 2) Ni, Co, Zn, Cu, Mo – ассоциирующие с Re; причем Zn, Cu являются элементами-маркерами исключительно рениевой минерализации.

По мнению авторов отчета (Новгородцев и др., 2005ф), особенности распределения и характер взаимосвязей элементов указывает на существенную роль в аккумуляции U и первой группы – органического вещества, литологического состава (соотношения песчаной и глинистой фракций) и процессов, приводящих к обогащению продуктивных пород сульфидами железа (сульфатредукции). Во второй группе элементов, куда входит и Re, отсутствуют сколько-нибудь значимые корреляционные связи между Re с одной стороны, и Si, C<sub>орг</sub> с другой. Это очевидно свидетельствует о подчиненной роли литологического или сингенетического фактора в локализации ренийевого, а, следовательно, и части уранового оруденения в пределах Скопинской рудоносной площади. Это, в свою очередь, предполагает участие в распределении и перераспределении рудных элементов эпигенетических процессов, активному протеканию которых способствовала высокая проницаемость средневизейских отложений.

## ГЛАВА II. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РУДНОГО РАЙОНА

### 2.1. Тектоника

Скопинский углепромышленный район расположен в области сочленения крупных структур I порядка Восточно-Европейской платформы: Воронежской антеклизы и Московской синеклизы. Территория характеризуется особенностями строения типичными для древних платформ.

Выделяются два резко различных в тектоническом отношении структурных этажа. Нижний – сильно дислоцированный докембрийский кристаллический фундамент (кровля которого расположена на глубине около 1 км) и верхний – облегающий его осадочный чехол.

О строении AR-PR докембрийского кристаллического фундамента вблизи месторождения можно судить по единичным скважинам и сейсмическим профилям. В глубокой скважине в селе Горлово, доведенной до кристаллического основания, на глубине 929,9-937,4 м вскрыты интрузивные породы, представленные кварцевыми сиенитами красного цвета (Урусбиева и др, 1963ф). Северо-западнее развиты ортогнейсы, восточнее (г. Ряжск) вскрыты диорито-гнейсы. Падение поверхности пород фундамента пологое (3,2 м/км) в северо-восточном направлении.

Восточнее рассматриваемой площади расположены Пачелмский авлакоген (примерно 50км к северо-востоку) и наследующий его более широкий Рязано-Саратовский прогиб (по границе распространения вендских отложений расположенный в первых десятках километров от площади). Пачелмский авлакоген представляет собой сложную систему горстов и грабенов ЮВ-СЗ ориентировки, к северо-западу смыкающуюся со Среднерусской системой авлакогенов. Грабены выполнены рифейскими отложениями.

Структуры II и более низких порядков представлены положительными (поднятиями, валами, выступами) и отрицательными (прогибами, впадинами, депрессиями) структурами. Здесь рассматривается структурное районирование Скопинской площади, на которой расположено Брикетно-Желтухинское месторождение, только в пределах листа N-37-XXII.

## 2.2. Стратиграфия

Неоднократно происходившие структурные перестройки, фиксируемые перерывами в осадконакоплении, предопределили деление осадочного чехла на несколько структурных этажей.

Отложения вендского возраста, маркирующие начальные стадии развития Рязано-Саратовского прогиба развиты восточнее. В пределах рудного поля U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения на породах фундамента с крупным угловым и стратиграфическим несогласием залегают породы ряжского горизонта нижнего девона, выше них развиты средне- и позднедевонские, ранне- и среднекаменноугольные, юрские, меловые, неогеновые отложения, и заканчивается разрез осадочного чехла четвертичными отложениями.

В строении рудного поля U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения участвуют следующие толщи (снизу–вверх): карбонатная верхнефаменская, представленная светло-серыми известняками и доломитами, каменноугольная песчаная и перекрывающая неоген-четвертичная песчано-глинистая толща. Детальное описание стратиграфии рудного района U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения приведено на рис. 2.1. Следует отметить, что озерский и хованский горизонты, по материалам ВСЕГЕИ N-37-XII (Государственная ..., 2015), относятся к верхнефаменскому подъярису девона ( $D_{3os+hv}$ ).

Система	Отдел	Ярус	Подъярус	Индекс	Литология	Мощность в м	Характеристика пород
НЕОГЕНОВАЯ	ПЛИОЦЕН			$N_{2kr}$		до 50	Кривоборские слои. Пески серые, светло-серые и белые, кварцевые, местами железненные, мелко- и среднезернистые с прослойкой крупнозернистого гравелистого песка
				$N_{2us}$		до 20	Усманские слои. Пески желтые и ярко-желтые, иногда белые, неравномерно железненные, кварцевые, в одних случаях тонко- и мелкозернистые, хорошо отсортированные, слюдястые, в других - разнозернистые с прослойками галечника и крупнозернистого песка, очень слабо слюдястые
	МИОЦЕН			$N_1$		до 35	Глины и пески, в основном, темной окраски. Глины слегка слюдястые, часто железненные. Пески обычно глинистые, кварцевые, от мелко- до среднезернистых, с отдельными крупными зернами кварца. Встречен спорово-пыльцевой спектр, характерный для миоцена
				$Cr_{1al}$		до 3	Пески кварцево-глауконитовые, разнозернистые, табачно-зеленых оттенков
МЕЛОВАЯ	НИЖНИЙ			АЛЬБСКИЙ $Cr_{1ap}$		до 20	Пески, в основном, белые, с редкими тонкими прослойками глины, с линзами песчаников, со спорово-пыльцевым спектром, характерным для апта
				БАРРЕМСКИЙ $Cr_{1b}$		до 25	Пески ярко-желтые, иногда желтовато-серые, тонкозернистые, сильно слюдястые, с маломощными прослоями глины, часто сильно железненных, слюдястых. Внизу изредка встречаются прослойки конгломерата
				ВАЛАЖИНСКИЙ $Cr_{1v}$		обычно до 13	Пески табачно- и травяно-зеленых оттенков, сильно слюдястые, с редкими маломощными прослоями глины, в основании песков иногда присутствует галька фосфоритов
				ОКСФОРДСКИЙ $J_{3ox}$		до 15	Глины сланцеватые с <i>Cardioceras rouillieri</i> Nik.
ЮРСКАЯ	ВЕРХНИЙ	КЕЛЛО-ВЕЙСКИЙ		$J_{3cl}$		обычно 10-15 до 35	В нижней части пески кварцевые, глинистые, с прослоями сильно железненных оолитовых мергелей, редко песчаников. Выше - глины песчанистые, с железистыми оолитами и желваками сидерита, с прослойками песка. В верхней части глины многочисленные <i>Kosmoceras cf. duncani</i> Sow., <i>Meleagrinnella echinata</i> (S m.), <i>Oxytoma inaequivalvis</i> Sow., <i>Nucula calliope</i> Orb., <i>Posidonomya buchi</i> Roem., <i>Quenstedticeras lamberti</i> Sow., <i>Q. flexicostatum</i> Phil., <i>Pseudomonotis echinata</i> Sow. и др.
				$J_{3cl}$		обычно 3-5 до 25	Глины черные, жирные, иногда песчаные, с прослоями глинистого песка. Встречен спорово-пыльцевой комплекс, характерный для конца бата-начала келловей
	СРЕДНИЙ	БАТСКИЙ		$J_{3cl}$		обычно 10-15	Михайловский горизонт. Известняки органогенно-обломочные, с <i>Semiplanus mikhailovensis</i> Sar., <i>Striatifera striata</i> Eichw., <i>Eostaffella ikensis</i> Vis s., <i>Bradyina rotula</i> Eichw. и др. В основании изредка маломощные пески или глины
				$J_{3cl}$		обычно 35-40 до 50	Алексинский горизонт. Внизу - пески или глины, иногда с прослойками бурого угля, выше - известняки органогенно-обломочные, иногда глинистые с <i>Bradyina rotula</i> Eichw., <i>Planoarchaediscus spirillinoides</i> Rau s., <i>Archaediscus moelleri</i> var. <i>gigas</i> Rau s., <i>Eostaffella proikensis</i> Rau s., <i>Semiplanus semiplanus</i> Schw.
КАМЕННОУГОЛЬНАЯ	НИЖНИЙ	ВИЗЕЙСКИЙ	СРЕДНЕ-ВИЗЕЙСКИЙ	$C_{1mh}$		до 60	Тульский горизонт. Внизу - пески кварцевые слюдястые, часто железненные, выше - глины известковистые, с прослоями бурых углей. Вверху - глины известковые, с одним-двумя прослоями известняков, с <i>Plectogyra similis</i> Rau s., et Reit., <i>P. omphalota</i> var. <i>minima</i> Rau s. et Reit., <i>Palaeotextularia longiseptata</i> Lip., <i>Endothyranopsis crassus</i> var. <i>crassa</i> Brady. и др.
				$C_{1al}$		15-22	Бобриковский горизонт. Глины темно-серые, черные, часто сланцеватые, с отпечатками растений, с желваками пирита. К нижней части горизонта приурочены два прослоя угля, с характерным для бобриковского горизонта спорово-пыльцевым комплексом. Местами в нижней части горизонта глины белые и пестроцветные, каолиновые
				$C_{1ll}$		10-14	Упиинский горизонт. Известняки с <i>Concrinella cf. panderi</i> Auer., <i>Eomartiniopsis cf. elongata</i> Sok., <i>Chonetes cf. upensis</i> Sok., <i>Camarotoechia cf. upensis</i> Sok.
				$C_{1up}$		до 76	Малевский горизонт. Глины известковые зеленоватых и голубоватых оттенков, с прослоями глинистых, сильно пиритизированных известняков с <i>Chonetes malevkensis</i> Sok., <i>Camarotoechia panderi</i> Sem., et Moell., <i>Punctospirifer malevkensis</i> Sok. и др.
				$C_{1ml}$		до 41	Озерский и хованский горизонты. Внизу - заглипсованные доломиты, гипсы с прослоями доломитов, глинистые мелкозернистые, массивные известняки. Вверху - известняки, глины известковые, известняки доломитизированные, иногда кавернозные, массивные, крепкие с <i>Eridocconcha socialis</i> Eichw., <i>E. socialis</i> var. <i>multicincta</i> Sam. et Sm., <i>Glyptolichwinella spiralis</i> Jones., et Kirkby.
				$C_{1os-hv}$		41	Киселево-никольские, орловско-сабуровские, тургеневские и кудаяровские слои. Доломиты с редкими прослоями известняков и гипсов. Встречаются прослойки известняково-доломитовых конгломератов
ДЕВОНСКАЯ	ВЕРХНИЙ	ФАМЕНСКИЙ	ВЕРХНЕ-ФАМЕНСКИЙ	$D_{3fm_2}$		34	Лебедянские и мценские слои. Доломиты, местами кавернозные, с гнездами гипса, с тонкими прослоями мергелей и доломитизированных известняков с <i>Glyptolichwinella adalaidae</i> Sam. и <i>Cavellina tambovensis</i> Sam.

Рис. 2.1. Стратиграфическая колонка рудного поля U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения по геологической карте масштаба 1:200000 по (Урусбиева и др, 1963ф).

### 2.3. Геологическое строение

В 2002-2005 гг. по результатам геолого-прогнозных работ ФГУП «Урангео» установлено, что в Скопинском районе и Брикетно-Желтухинском месторождении основными рудовмещающими породами являются аллювиальные отложения бобриковского горизонта. Они залегают на карбонатных породах фаменского яруса верхнего девона и с размывом перекрываются «позднеюрско-нижнемеловыми мелководно-морскими песчано-глинистыми отложениями», на которых, также с размывом залегают неоген-четвертичные осадки. Согласно данным геологических карт масштаба 1:200000, в пределах Брикетно-Желтухинского месторождения мезозойские отложения в кровле визейских толщ отсутствуют (рис. 2.2), и объединение разреза вскрыши в единый мезозойско-кайнозойский комплекс, для рудного поля, представляется излишним.

Перекрывающая продуктивную толщу неоген-четвертичные отложения представлены чередованием песков, глин и смешанных типов пород преимущественно бурой, коричневатой и желтоватой окраски. Мощность составляет от 40 до 50 метров в зависимости от гипсометрической позиции устья конкретной скважины. В низах вскрышной толщи расположен базальный горизонт, сложенный песками до грубозернистых, мощностью до первых десятков сантиметров, насыщенный гравийными обломками кварца, кремней, нередко обломков окремнелых известняков верхневизейско-серпуховского возраста. К данному прослою приурочен горизонт вторичного окремнения, в большинстве случаев фиксирующий верхнюю границу рудоносной толщи.

В пределах Скопинского района среди отложений фаменского яруса в разрезе преобладают известняки, подчиненно развиты прослои доломитов и аргиллитов. Максимальная вскрытая мощность девонских отложений в пределах месторождения 110 м. Кровля карбонатных пород подверглась интенсивным гипергенным изменениям с образованием «специфичной коры выветривания», сложенной обломками известняка, «цементированными глинисто-песчаным материалом аллювиальных осадков визейского яруса». Местами известняки фундамента интенсивно раздроблены (Карась и др, 2015ф).

Детальное описание геологического строения U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения описано в Главе III.



1 – песчано-глинистые отложения неогеновой системы нерасчлененные; 2-4 – песчаные отложения нижнего отдела меловой системы: 3 – аптский ярус; 4 – барремский ярус; 5 – валанжинский ярус; 5-7 – глинисто-песчаные отложения юрской системы: 5-6 – верхнего отдела: 5 – оксфордский ярус; 6 – келловейский ярус; 7 – батский ярус и нижняя часть келловейского яруса (нерасчлененные отложения среднего и верхнего отделов); 8 – песчаные толщи среднего отдела каменноугольной системы, азовская серия (только на разрезе); 9-13 – песчано-глинисто-карбонатные отложения нижнего отдела каменноугольной системы: 8-9 – известняки верхневизейского подъяруса: 9 – михайловский горизонт; 10 – алексинский горизонт; 11-12 – пески и глины средневизейского подъяруса: 11 – тульский горизонт; 12 – бобриковский горизонт; 13-14 – глины и известняки нижнетурнейского подъяруса: 13 – малевский горизонт; 14 – карбонатные отложения верхнефаменского подъяруса, озерский и хованский горизонты; 15 – границы угольных залежей в бобриковском горизонте, 16 – U-Mo-Re оруденение; 17-18 – литологический состав (только на разрезе): 17 – песчаные толщи рудовмещающего бобриковского горизонта; 18 – известняки и доломиты верхнефаменского подъяруса (16-18 – только на разрезе).

#### **2.4. Полезные ископаемые**

Скопинский район – старейший углепромышленный район Подмосковского угольного бассейна, однако большая часть месторождений бурого угля уже не эксплуатируется. Основным угольным пластом является нижний угольный пласт, залегающий в глинах бобриковского горизонта. Размеры залежей угольного пласта рабочей мощности достигают 15–20 км<sup>2</sup>. Мощность пласта изменяется от 1.1 до 5.5 м при преобладающей мощности 1.5–1.8 м. Глубина залегания 50–60 м. Гидрогеологические условия разработки, как правило, неблагоприятны из-за сильного напора подземных вод верхнедевонского стратиграфического уровня.

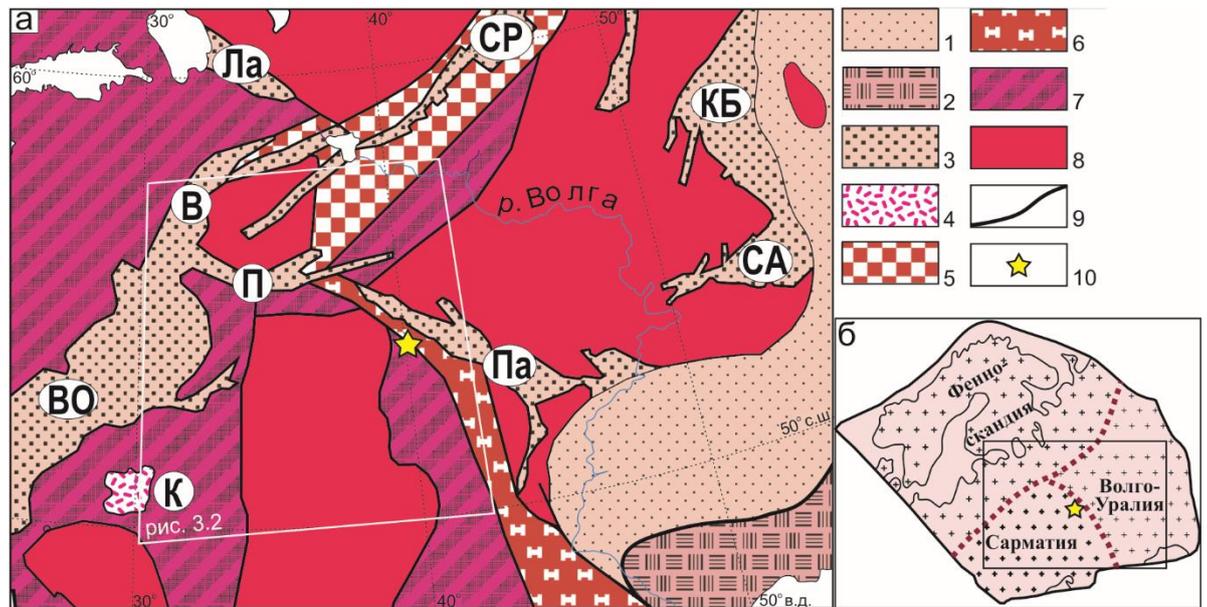
Вблизи участка Брикетно-Желтухинского месторождения расположены следующие месторождения бурых углей: западнее - Восточно-Вердинское, Поплевинское и Вердеровское; севернее – Чижовская площадь, Яблоневский участок, западные части Волковского месторождения и Ковалинского участка; юго-восточнее – Ряжское.

## ГЛАВА III. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ U-Мо-Re БРИКЕТНО-ЖЕЛТУХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

### 3.1 Геолого-тектоническая позиция U-Мо-Re Брикетно-Желтухинского месторождения

Брикетно–Желтухинское месторождение расположено в Рязанской области, в 12 км к юго-востоку от г. Скопин. Территория соответствует зоне сочленения Воронежской антеклизы, расположенной южнее, и Московской синеклизы, открывающейся к северу, а также принадлежит линейной структуре, разделяющей мегаблоки Сарматия и Волго-Уралия (Bogdanova et al., 2008; Kuznetsov et al., 2010). Северо-восточнее площади месторождения расположены Пачелмский авлакоген (рис. 3.1) и наследующий его более широкий Рязано-Саратовский прогиб. Последний является осложняющей впадиной Московской синеклизы (в основном наследующей Среднерусскую систему авлакогенов (Чамов, 2005, 2015)).

Пачелмский авлакоген представляет собой сложную систему грабенов юго-восточной ориентировки, которая на северо-западе смыкается со Среднерусской системой авлакогенов; грабены в основном выполнены рифейскими осадочными отложениями (Бибикова и др., 2009). Пачелмский авлакоген ограничивает с северо-востока Воронежскую антеклизу, включающую Воронежский кристаллический массив. Рязано-Саратовский прогиб в венде–палеозое развивался над Пачелмским авлакогеном как наложенная впадина и испытал в мезозое–кайнозое инверсию с образованием Окско–Цнинского вала. Отмечается постепенное снижение интенсивности тектонического нарушения структур осадочного чехла по мере удаления от Пачелмского авлакогена. Большинство инверсионных структур в виде флексур и валлообразных зон, осложняющих прогиб, унаследовали своё положение от древних разломов. Образование структурных ступеней и пологих пликативных элементов в осадочной толще связано с неравномерными движениями блоков кристаллического фундамента в зонах главных грабенообразных прогибов и на их периферии (“плечах” авлакогена) и склонах сопредельных поднятий. Через территорию месторождения протягивается субмеридиональный Двуреченско–Липецкий долгоживущий разлом – северное продолжение Лосевско–Мамонского разлома (Тектоническая карта ..., 1988; рис. 3.2).



**Рис. 3.1.** Позиция месторождения в структурах фундамента юго-восточной части Восточно-Европейской платформы (а) (Bogdanova et al., 2008); на врезке (б) – контуры протократонов ВЕП (упрощено по Kuznetsov et al., 2010).

1, 2 – неоднородно метаморфизованные неопротерозойские–среднекембрийские комплексы восточной и юго-восточной частей ВЕП: 1 – протоуралиты–тиманиды преимущественно осадочные, 2 – кадомиды–авалониды; 3 – мезо- и неопротерозойские недифференцированные комплексы рифтогенных впадин и авлакогенов: Па – Пачелмский, Ла – Ладожский, П – Подмосковский, КБ – Камско–Бельский, В – Валдайский, СА – Серноводско–Абдулинский, ВО – Волынско–Оршанский, СР – Среднерусский; 4 – палеопротерозойский Коростеньский плутон (К, габбро–анортозиты–рапакиви); 5–7 – палеопротерозойские аккреционные и коллизионные орогены: 5 – Центрально–Русский, 6 – объединивший Волго–Уралию и Сарматия, 7 – недифференцированные орогенные комплексы; 8 – архейские недифференцированные комплексы; 9 – главные разломы; 10 – Брикетно–Желтухинское месторождение.

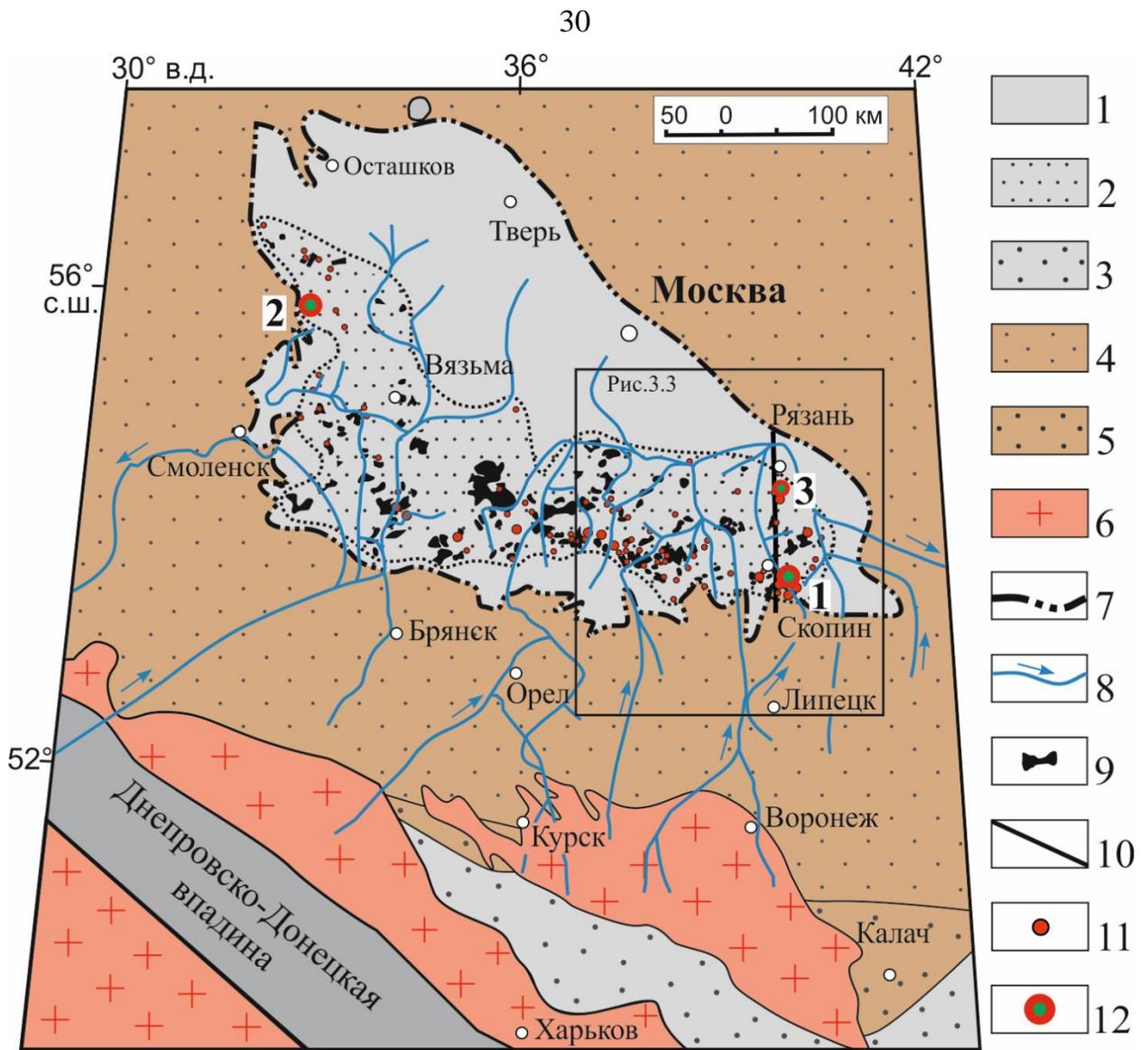
В геологическом строении района выделяются два структурных этажа. Нижний – сильно дислоцированный и гетерогенный по своей природе докембрийский кристаллический фундамент (Бибикова и др., 2009; Государственная ..., 2015), кровля которого расположена на глубине ~1 км. Верхний – перекрывающий фундамент осадочный чехол, в средней части которого локализовано месторождение. Осадочный чехол Русской плиты в свою очередь подразделяется на 2 подэтажа: пологолежачий палеозойский (девонско–каменноугольный) и залегающий горизонтально, местами с ясно выраженным несогласием, мезо-кайнозойский (юрско-четвертичный).

Южная часть Московской синеклизы, включая рассматриваемый Скопинский район, входит в Подмосковский бурогольный бассейн (Павлова, Тимофеев, 2000),

который характеризуется попутной металлоносностью. Месторождения угля в песчано-глинистых отложениях визе (C<sub>1v</sub>) локализованы, в основном, в южной части бассейна (см. рис. 3.2) – в широкой полосе, соответствующей Горопец-Рязано-Саратовской мегазоне (рис. 3.3), которая разделяет Сарматский и Волго-Уральский блоки Русской плиты (Чамов, Горбачев, 2004; Bogdanova et al., 2008) (см. рис. 3.1). Урановое оруденение также тяготеет к этой зоне. Брикетно-Желтухинское месторождение находится на южной границе названной мегазоны. В краевой части этой межблоковой структуры локализовано и Бельское месторождение урана (Кременецкий и др., 2011).

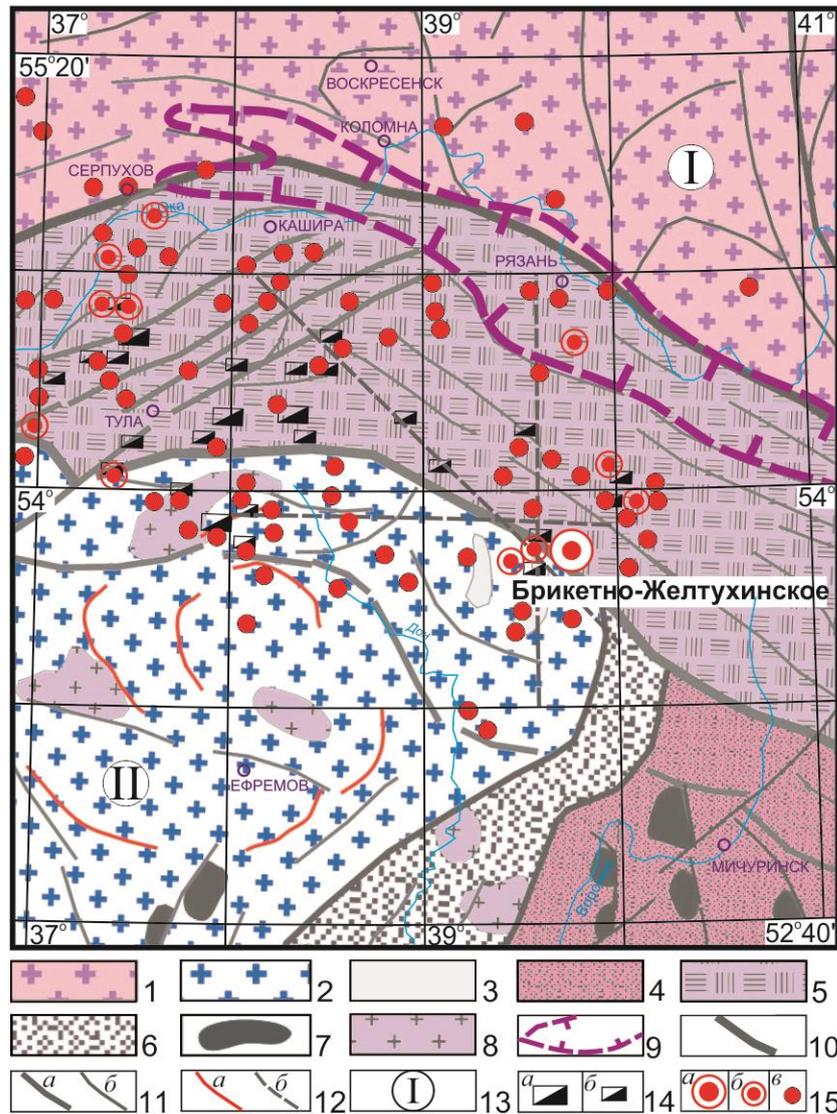
### **3.2 Геологическое строение месторождения и литологическая характеристика слагающих его пород**

Брикетно-Желтухинское месторождение и ряд других урановых проявлений локализованы в южной части Подмосковского буроугольного бассейна и приурочены к отложениям палеоделът (Карась и др., 2017). В процессе исследований были изучены бурением как рудовмещающая песчаная толща бобриковского горизонта (C<sub>1v</sub>), так и, отчасти, подстилающие их карбонатные отложения фаменского яруса (D<sub>3fm</sub>). Рудовмещающая толща представлена мелко-среднезернистыми песками от светло-серого до темно-серого цвета с различными оттенками; карбонатная толща – от светло-серого до коричневатого-серого цвета. Перекрывающие продуктивную толщу неоген-четвертичные отложения представлены чередованием песков, глин, алевролитов и пород смешанного типа преимущественно бурой, коричневатой и желтоватой окраски. В основании толщи неоген-четвертичных отложений залегает базальный горизонт, мощностью до первых десятков сантиметров. Он сложен песками (до грубозернистых) и насыщен гравийными обломками кварца (п.мм), кремней (до 1–2 см), изредка – обломками окремнелых известняков поздневизейско-серпуховского возраста (Карась и др., 2017).



**Рис. 3.2.** Палеогеографическая реконструкция центральной части Восточно-Европейской платформы для ранне-средневизейского времени, по (Палеогеоморфологический ..., 1983; Махлина, 1993; Карась и др., 2017) с изменениями и дополнениями.

1–3 – ниже-средневизейские отложения: 1 – преимущественно глинистые (озерные и мелководно-морские фации), 2 – преимущественно песчаные (дельтовые фации бобриковских палеорек), 3 – песчаные (фации аллювия); 4 – верхнедевонско-нижнекаменноугольные карбонатно-терригенные отложения в области размыва; 5 – верхнедевонские терригенные отложения (прибрежно-морские фации) в области размыва; 6 – выступы докембрийского кристаллического фундамента; 7 – граница визейского Подмосковного буроугольного бассейна; 8 – русла палеорек с направлением течения; 9 – болота (залези бурого угля); 10 – долгоживущий Двуреченско-Липецкий разлом; 11 – проявления урана; 12 – месторождения с установленной рениевой минерализацией (1 – Брикетно-Желтухинское, 2 – Бельское, 3 – Алексеевское урановорудное проявление).



**Рис. 3.3.** Размещение месторождений и проявлений угля и урана в визейских отложениях осадочного чехла Русской плиты по отношению к структурам докембрийского фундамента, упрощено по (Егоров, 2004).

1, 2 – блок с архейской континентальной корой: 1 – биотит–плагиоклазовые, плагиомикроклиновые гранитогнейсы, кристаллосланцы Волго–Уралии, 2 – кислые и средние плагиогнейсы, амфиболиты, кристаллосланцы, плагиограниты и мигматиты Сарматии; 3 – архейские зеленокаменные пояса; 4 – палеопротерозойские осадочно–вулканогенные комплексы внутриплитных рифтогенных структур и пассивных континентальных окраин; 5, 6 – межблоковые зоны, на месте палеопротерозойских океанических и рифтогенных бассейнов: 5 – комплексы границ литосферных плит (Торопец–Рязанско–Саратовская мегазона), 6 – осадочно–вулканогенные комплексы деформированных рифтогенных структур; 7, 8 – интрузивные комплексы Сарматии: 7 – мафит–ультрамафитовые, 8 – палеопротерозойских плагиомикроклиновых гранитов; 9 – Пачелмский авлакоген; 10 – тектонические границы главных структур консолидированной земной коры; 11 – разломы структур второго (*a*) и третьего (*б*) порядков; 12 – прочие разломы: (*a*) дуговые и кольцевые разломы, отдешифрированы по космоснимкам, (*б*) – долгоживущие разломы; 13 – геоблоки (I – Волго–Уралия, II – Сарматия); 14 – месторождения угля (*a* – средние, *б* – малые); 15 – месторождения (*a*), рудопроявления (*б*) и аномалии (*в*) урана.

### 3.2.1. Краткая характеристика карбонатных пород низов разреза

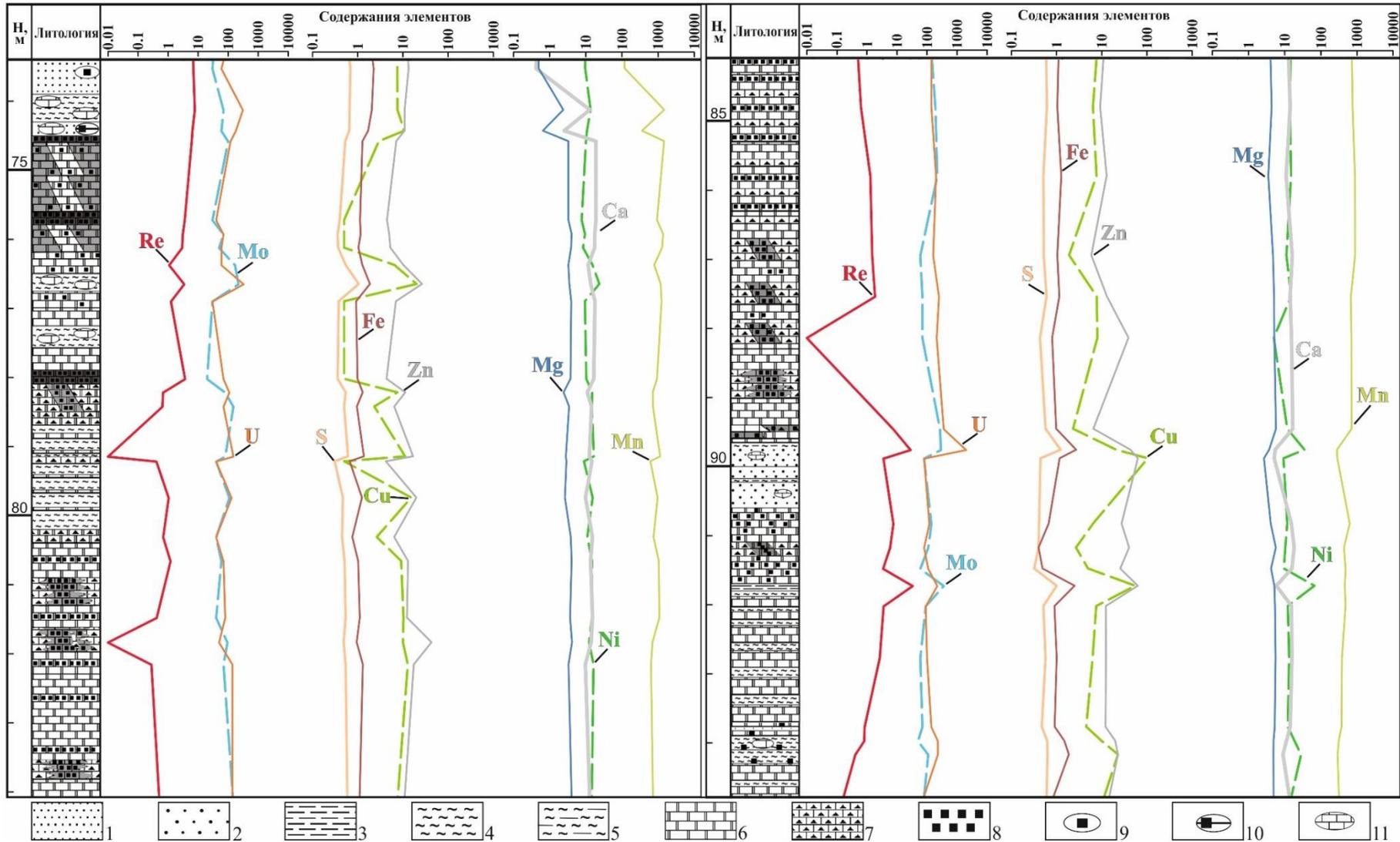
Основание разреза месторождения сложено породами фаменского яруса верхнего девона, которые представлены в основном известняками, при подчиненной роли доломитов, включают маломощные прослой глин и мергелей. Структурно-текстурные особенности этих пород изучались в скважине Г-6 (рис. 3.5, табл. 3.1), пробуренной в центральной части месторождения. Эта скважина вскрывает подрудную карбонатную толщу на максимальную глубину (~20 м). Разрез её здесь представлен незакономерным чередованием пачек брекчиевидных доломитов (рис. 3.4б) и пачек раздробленных тонкослоистых темно-серых доломитов (рис. 3.4а), иногда с прослоями глин и мергелей. Некоторые разности представлены магниальными известняками. Мощность пачек обычно составляет первые десятки сантиметров, а мощность слойков в тонкослоистых пачках изменяется от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров. В доломитах в виде тонких прослоев и по зеркалам скольжения развита сульфидная минерализация. Подчиненную роль играют маломощные (5–10 см) прослой темно-серых глин, коричневатато-серых песков и серых алевроитов.



**Рис. 3.4.** Типичные доломиты, вскрытые скважиной Г-6: а) расслоенный “зевровидный” доломит с элементами брекчиевидной текстуры и тонким чередованием полос серого, темно-серого и коричневатато-серого цветов, с тонкой послойной сульфидной минерализацией, разбитый мелкими тектоническими нарушениями; б) брекчиевидный доломит, разбитый криволинейным тектоническим нарушением. Фотографии образцов керна.

В кровле карбонатных отложений скважиной вскрыты прослой тонкообломочной интенсивно сульфидизированной породы (инт. 74.5–74.6 м и 75.8–76 м). Содержания Re в этих интервалах составляют 0.61 и 0.36 г/т, соответственно. В верхнем интервале отмечается тонкая слоистость, ориентированная под углом 45°, а в нижнем – субвертикальные и субгоризонтальные трещины с сульфидными примазками. Эти образования можно сопоставить с существенно сульфидным интервалом (мощностью до первых метров), вскрытым в кровле карбонатной толщи соседними скважинами, где содержания рения составляют от 1 до 10 г/т. Подобные существенно сульфидные породы не наблюдались в кровле карбонатной толщи, вскрытой другими скважинами. В доломитах сульфидная минерализация встречается также в виде маломощных прослоев и тонкорассеянной вкрапленной минерализации (рис. 3.4а).

Выше кровли карбонатов присутствуют слои: темно-серой глины, насыщенной неокатанными обломками карбонатных пород от песчаной до щебнистой размерности (инт. 73.9–74.3 м), темно-серого среднезернистого кварцевого песка (инт. 74.3–74.5 м) с неокатанными обломками темно-серых карбонатных пород (размерность до крупногравийной) и обломками угля (первые мм).



**Рис. 3.5.** Литологическая колонка карбонатного “фундамента”, вскрытого скважиной Г-6, и распределение содержания химических элементов:  
Ca, S, Fe, Mg – масс. %, остальные – г/т.

1 – пески среднезернистые; 2 – пески разномерные; 3 – алевроиты; 4 – глины; 5 – глины алевроитистые; 6 – доломиты; 7 – брекчия доломитов; 8 – сульфиды; 9–11 – конкреционные стяжения: 9 – сульфиды; 10 – сульфиды с обломками углей; 11 – карбонаты. Описание пород, включая окраску, см. табл. 1. Литологическая колонка выполнена с использованием неопубликованных материалов С.Ю. Орлова.

**Таблица 3.1.** Послойное описание карбонатной толщи, вскрытой скважиной Г-6

Интервал, м	Описание пород
73.1–73.9	Песок среднезернистый темно-серый, со стяжениями сульфидов (разм. п·мм)
73.9–74.3	Глина темно-серая, с обломками светло-серого известняка
74.3–74.5	Песок коричневатого-серый до темно-серого, среднезернистый, с обломками доломита коричневатого-серого
74.5–75.8	Доломит коричневатого-серый до темно-серого с тонкозернистыми сульфидами
75.8–76.0	Переслаивание доломитов серых, светло-серых и темно-серых с сульфидной минерализацией, прослой 2–3 см
76.0–76.5	Доломит серый, с сульфидной минерализацией
76.5–76.75	Глина темно-серая, с обломками доломитов
76.75–77.9	Доломит коричневатого-серый, с сульфидной минерализацией, включает прослой (15 см) глины серой с обломками доломитов
77.9–78.1	Интенсивно сульфидизированный битуминозный доломит
78.1–78.3	Доломит темно-серый, с сульфидной минерализацией
78.3–78.5	Брекчия доломита коричневатого-серого и темно-серого, с сульфидами
78.5–79.15	Глина темно-серая, с обломками доломитов коричневатого-серых
79.15–79.25	Доломит темно-серый брекчиевидный
79.25–80.2	Глина темно-серая, с прослоями (до 5 см) темно-серого раздробленного известняка
80.2–80.4	Доломит темно-серый брекчиевидный, с сульфидной минерализацией
80.4–80.9	Доломит серый с примазками сульфидов, раздробленный в верхней и средней частях интервала, с прослоями темно-серого известняка
80.9–82.3	Доломиты темно-серые тонкослоистые, интенсивно раздробленные. В средней части интервала – доломиты сульфидизированные, расслоенные (наклон слоев 45° относительно оси керна) и брекчиевидные
82.3–86.3	Доломиты темно-серые до черных, тонкослоистые, интенсивно раздробленные, с неравномерной послойной сульфидной минерализацией, включают прослой (10-15 см) брекчиевидных сульфидизированных доломитов
86.3–87.1	Брекчия доломитов серых, коричневатого-серых и темно-серых, с сульфидной минерализацией. В верхней части интервала – доломит серый тонкослоистый, рассеченный ступенчатыми и субгоризонтальными темно-серыми сульфидными прожилками. В средней и нижней частях интервала преобладают доломиты светлые коричневатые, рассеченные наклонными (под крутыми углами) зонками темно-серой сульфидной массы, “разъедающей” доломит
87.1–88.0	Чередование доломитов темно-серых тонкослоистых, раздробленных и доломитов светлых брекчиевидных, сульфидизированных
88.1–88.3	Доломиты светлые коричневатые брекчиевидные; обломки остроугольные, сцементированы коричневатого-серой и темно-серой сульфидизированной массой
88.3–89.75	Переслаивание доломитов серых и темно-серых, тонкослоистых; в средней части интервала – брекчиевидные доломиты
89.75–89.8	Глина темно-серая алевроитовая
89.8–90.6	Песок коричневатого-серый разномзернистый (средне-крупнозернистый), с неокатанными обломками коричневатого-серых доломитов размером 1-2.5 мм
90.6–91.7	Доломиты серые, темно-серые и коричневатые, расслоенные, в верхней и нижней частях интервала – интенсивно дезинтегрированные, с развитием сульфидов по трещинам
91.7–91.8	Алеврит темно-серый до черного
91.8–93.3	Доломиты серые, с прослоями серых карбонатных глин
93.3–93.9	Доломит серый горизонтально-слоистый, с сульфидной минерализацией, с прослоями (до 10 см) глины темно-серой
93.9–94.1	Глина серая карбонатная, в нижней части обломки доломитов желтовато-коричневых; вблизи нижней границы – тонкий (1 мм) прослой черной глины
94.1–94.3	Глина темно-серая карбонатная, в основании интервала – тонкий (2 см) прослой глины темно-серой, почти черной
94.3–95.3	Переслаивание серых доломитов и мергелей с серой карбонатной глиной, пачки 5-15 см

Разрез, вскрытый скважиной Г-6, отличается широким развитием брекчиевидных доломитов. Для этих разновидностей доломитов характерны следующие особенности:

- сложная форма “обломков” светлых доломитов (удлиненные и изогнутые, ромбовидные с заостренными краями), морфология которых не согласуется с их осадочным происхождением;
- частая субвертикальная ориентировка удлиненных обломков, параллельная или субпараллельная трещинам;
- наличие тонких перемычек между некоторыми “обломками”;
- совпадение рисунков на границах отдельных смежных обломков и зональное распределение различных типов цемента между ними;
- присутствие “косослоистых” текстурных элементов (расслоенность, ориентированная под различными углами);
- в ряде случаев наблюдаются постепенные переходы от “обломков” к цементу.

Наряду с брекчиевидным строением (разориентация обломков), встречаются серии малоамплитудных разрывов (со смещениями до первых сантиметров), обычно крутопадающих (см. рис. 3.4а, б). Очевидно, что обломочное строение обусловлено преобразованием исходной карбонатной породы при развитии брекчирования, происходившим под воздействием возросшего литостатического давления. Сходные брекчиевидные породы были вскрыты и в ряде других скважин. В участках тонкой расслоенности доломитов, их текстурные особенности близки к “зебровым” текстурам доломитов, вмещающих Pb–Zn месторождения в карбонатных толщах (Wallace, 1994) – типа долины Миссисипи (MV-тип). Сульфидная минерализация в брекчиевидных доломитах является достаточно типичной для месторождений MV-типа и родственных ему (Донец и др., 2017; Hutchinson, 1996), а для самих рудоносных доломитов широко принято гидротермально-метасоматическое происхождение (Davies, Smith, 2006).

Следует отметить, что в большинстве других скважин, вскрывших карбонатные породы (на 1–2 м ниже визейских песков), брекчиевидные текстуры не были встречены, но сульфидная минерализация отмечалась практически всегда. Содержания Re ( $C_{Re}$ ) ~ 0.05–0.5 г/т в карбонатных породах в целом не высокие, но

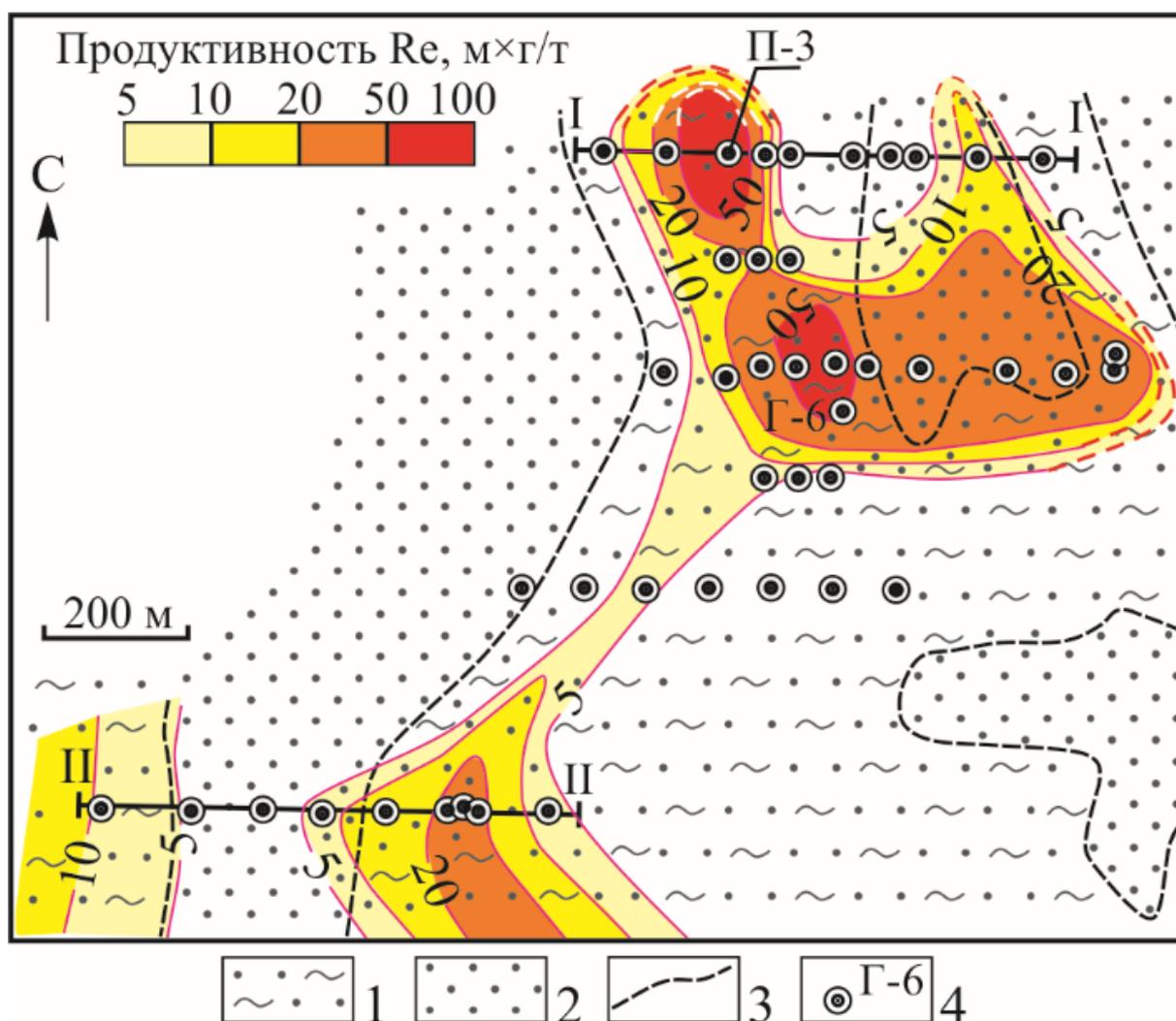
близки к рудным (рис. 3.5);  $C_{Re}$  достигают первых г/т в терригенных прослоях и контактирующих с ними прослоях тонкослоистых доломитов.

### 3.2.2. Характеристика рудовмещающей песчаной толщи

Рудовмещающие отложения, залегающие выше карбонатных пород, представлены бобриковской свитой визейского яруса каменноугольной системы; в пределах рудного поля её мощность достигает до 60 м. Рудоносные отложения в основном относятся к русловым и пойменно-болотным осадкам (Карась и др., 2017; Викентьев, Кайлачаков, 2020) и представлены преимущественно серыми и темно-серыми мелко-среднезернистыми кварцевыми песками, обогащенными органическим детритом и содержащими рассеянные до обильных скоплений сульфидов. К линзам и прослоям углистого детрита, как правило, сульфидизированного, пространственно тяготеют области повышенных и максимальных концентраций Re, а также Mo и U.

*Русловые* накопления слагают основную часть разреза и представлены преимущественно серыми и темно-серыми мелко-среднезернистыми кварцевыми песками, обогащенными органическим детритом и содержащими рассеянные скопления сульфидов. Относительно грубообломочные средне- и крупнозернистые, плохо сортированные разности песков развиты спорадически и в основном соответствуют стрежневой фации. Песчаные породы этой фации приурочены к основному тальвегу палеореки, который прослеживается в меридиональном направлении в пределах западной части месторождения, шириной около 1 км (рис. 3.6).

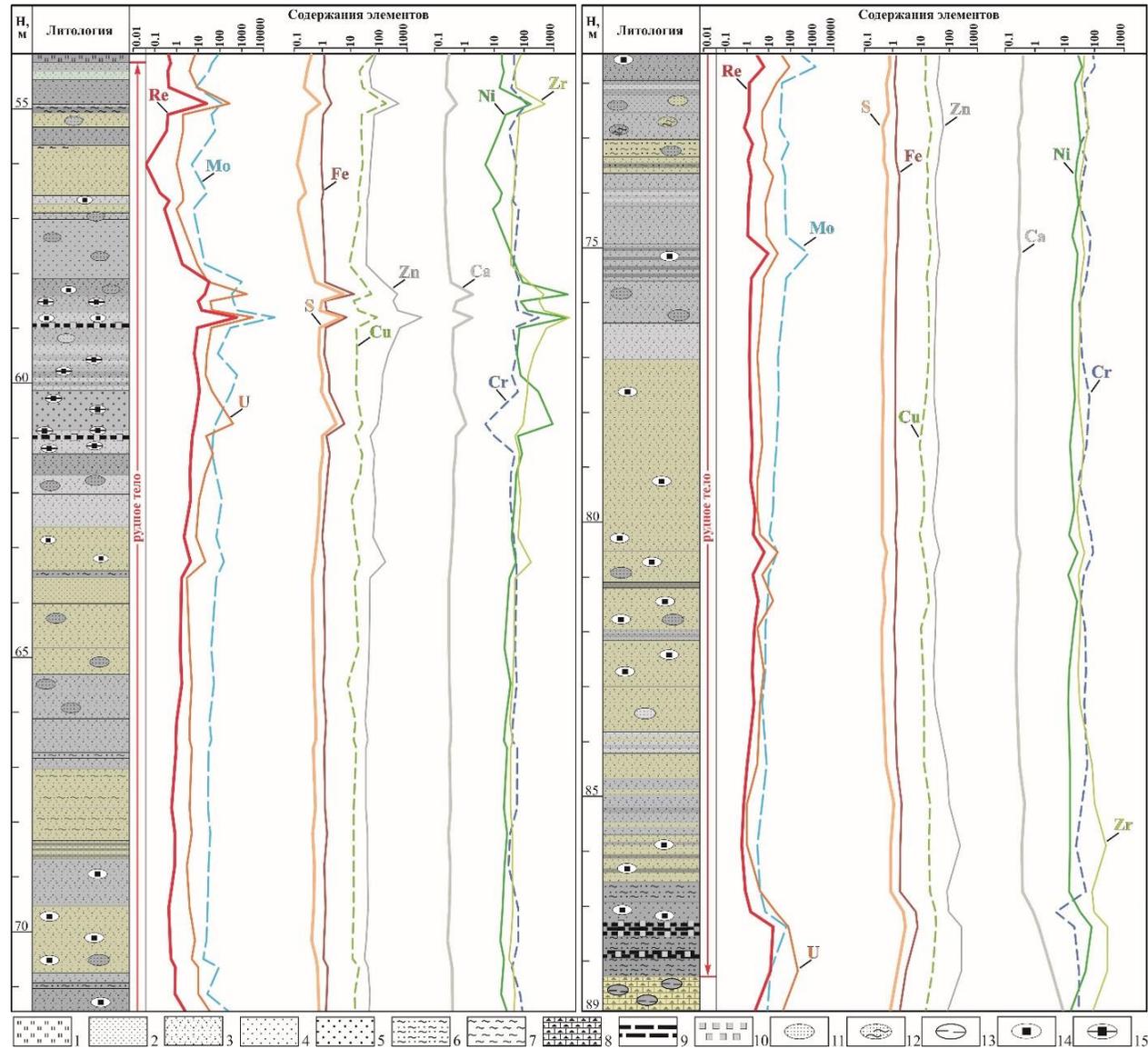
*Пойменные* фации распространены, в основном, на западном и восточном флангах месторождения, где представлены глинами, реже алевритами и прослоями бурых углей; мощность их незначительная (2–4 м), редко достигает 15–20 м.



**Рис. 3.6.** Изолинии продуктивности рениевого оруденения в бобриковской свите Брикетно–Желтухинского месторождения на литолого–фациальной схеме, по (Карась и др., 2016, 2017) с изменениями и дополнениями. I–I и II–II – линии разреза.

1 – пески с прослоями и линзами углистых глин, углей, алевритов; 2 – пески разнозернистые с гравием и редкими прослоями глин; 3 – границы преобладания фаций русловых (неугленосные) или пойменных, старичных, лагунных (угленосные); 4 — скважины, данные опробования керна которых использовались и номера скважин материалы, по которым обсуждаются в тексте.

Породы бобриковского горизонта характеризуются преобладанием серой и темно–серой окраски, что типично не только для глинисто–угольных прослоев, но и для песчано–алевритовых отложений (рис. 3.7). Природа этой окраски обусловлена серыми оттенками кварцевых песков, их высокой насыщенностью углистым детритом, а также обилием дисульфидов железа, часто образующих псевдоморфозы по углисту детриту. Прослой углей обычно фиксируются в кровле седиментационных ритмов. Подобные ритмы выражены нечетко, их корреляция в разрезах разных скважин затруднена в связи с фациальной изменчивостью толщи в латеральном направлении.



**Рис. 3.7.** Литологическая колонка рудоносной бобриковской толщи, вскрытой скважиной П-3 (природная окраска пород) и распределение в породах некоторых химических элементов. Величины содержания для Ca, S, Fe приведены в масс. %, для остальных элементов – в г/т (Кайлачаков, 2019).  
 1 – кремнистый прослой; 2 – пески мелкозернистые; 3 – пески мелко-среднезернистые; 4 – пески среднезернистые; 5 – пески крупнозернистые; 6 – пески глинистые; 7 – глины уплотненные; 8 – доломиты раздробленные; 9 – прослои углей; 10 – сульфиды; 11–15 – конкреции и стяжения уплотненного песка (11), песка глинистого (12), аргиллитов (13), сульфидов (14), сульфидов с обломками углей (15).

Таблица 3.2. Послойное описание разреза рудоносной бобриковской толщи, вскрытого скважиной П-3

Интервал, м	Описание пород
54.0–54.15	слабоокатанные обломки кремней размерностью около 2 см
54.15–54.9	переслаивание песков от тонко– до среднезернистых различных оттенков серого цвета, со светло-серыми пятнами
54.9–55.05	глина черная с прослоем (2 мм) песка мелкозернистого светло–серого
55.05–55.65	песок мелко–среднезернистый темно–серый и коричневато–серый, с серыми пятнами.
55.65–56.55	песок мелко–среднезернистый коричневато–серый
56.55–57.0	переслаивание песков мелко–среднезернистых коричневато–серых и светло–серых, с сульфидными конкрециями
57.0–58.1	песок среднезернистый серый, с темно–серыми пятнами
58.1–58.9	переслаивание песков мелко–среднезернистых различных оттенков серого цвета, с серыми и темно-серыми пятнами; отдельные прослои насыщены некрупными (6х3 см) стяжениями уплотненного песчаника темно–серого, углистого, с прослоями сульфидов
58.9–58.95	уголь черный, с тонкими (до 2 мм) слойками сульфидов
58.95–60.1	переслаивание песков мелко–среднезернистых различных оттенков серого цвета, с серыми и светло–серыми пятнами; встречаются редкие обломки (размерностью в первые см) угля черного с тонкими (1–2 мм) слойками сульфидов
60.1–60.8	песок крупнозернистый серый, с редкими обломками угля черного с тонкими слойками сульфидов
60.8–61.0	песок мелко–среднезернистый серый, с прослоями и стяжениями песка уплотненного с обломками угля и тонкими слойками сульфидов
61.0–62.6	переслаивание песков мелко–среднезернистых различных оттенков серого цвета, с темно–серыми пятнами; в кровле пачки – редкие стяжения песка уплотненного мелко–среднезернистого, углистого, с пиритом
62.6–63.4	песок мелко–среднезернистый коричневато–серый, с редкими конкрециями сульфидов
63.4–63.5	песок глинистый темно–серый до черного
63.5–65.3	песок мелко–среднезернистый коричневато–серый, с редкими темно-серыми пятнами
65.3–67.0	песок мелко–среднезернистый серый, с редкими темно-серыми пятнами, включает прослой (1-2 см) песка глинистого
67.0–68.65	песок мелко–среднезернистый коричневато–серый, с прослоями песка глинистого (2–3 см) и песка темно–серого (1–2 см)
68.65–69.5	песок мелко–среднезернистый серый, с редкими конкрециями сульфидов
69.5–70.7	песок мелко–среднезернистый коричневато–серый, с конкрециями сульфидов и редкими темно–серыми пятнами в подошве слоя
70.7–71.9	песок мелко–среднезернистый, местами глинистый, темно–серый, с конкрециями сульфидов, граница с вышележащим слоем песка постепенная
71.9–72.5	песок уплотненный тонкозернистый, серый до темно–серого, с пятнами темно-серого и коричневато–серого песка
72.5–73.6	песок мелко–среднезернистый, местами глинистый, коричневато–серый и серый, с прослойкам (0.5 см) и пятнами песка темно–серого тонкозернистого, глинистого,
73.6–74.9	песок мелко–среднезернистый серый, с прослойками (2–3 мм) светло–серого песка
74.9–77.0	песок мелко–среднезернистый серый, с прослойками (до 0.5 см) и пятнами песка темно–серого, местами уплотненного, с редкими конкрециями сульфидов
77.0–80.4	песок мелко–среднезернистый коричневато–серый, с редкими конкрециями сульфидов
80.4–83.6	песок мелко–среднезернистый, местами уплотненный, коричневато–серый, с прослойками (от первых мм до 1–2 см) и пятнами песка тонкозернистого серого и темно–серого, с конкрециями сульфидов
83.6–85.45	переслаивание песков мелко–среднезернистых темно–серых, серых и коричневато–серых
85.45–86.3	песок мелко–среднезернистый коричневато–серый, с прослоями (3–5 см) темно–серого песка
86.3–86.65	песок глинистый темно–серый
86.65–87.05	песок среднезернистый темно–серый, с редкими конкрециями пирита диаметром в первые сантиметры
87.05–87.3	уголь черный с прослоями сульфидов мощностью до 1 мм
87.3–88.0	песок плотный мелкозернистый, темно–серый до черного, с прослоями (до 2 мм) песка черного глинистого и угля, а также с прослоями сульфидов мощностью до 1 мм
88.0–89.0	брекчии доломитов с подчиненными обломками черных аргиллитов

Особенности строения аллювиальной толщи бобриковской свиты можно рассмотреть на примере представительной литологической колонки, построенной для скважины П-3 (таблица 3.2, рис. 3.7):

– на известняках и доломитах фаменского яруса залегают песчано–глинистые отложения, включающие конкреции сульфидов диаметром до 0.5 см и прослой (до 5 см) углей с богатым рениевым оруденением (около 15 г/т Re);

– в пределах интервала глубин 87–67.5 м наблюдается переслаивание мелко–среднезернистых песков коричневато-серой и темно-серой окраски, включающих конкреции сульфидов с повышенным содержанием рения (1.5 г/т) на фоне в целом невысоких его концентраций в песчаных породах;

– в интервале 67.5–58 м, в мелко-среднезернистых песках, окрашенных в различные оттенки серого цвета, происходит постепенное возрастание содержания рения, вплоть до пиковых значений – десятки и сотни г/т Re. Высокие содержания Re в этой пачке приурочены к прослоям углей, а также к участкам скопления конкреций сульфидов и обломков углистого материала размерностью от первых мм до первых см;

– выше по разрезу, на протяжении трех метров, концентрация Re заметно уменьшается, вплоть до 0.02 г/т, и только в интервале 56–55 м вновь несколько возрастает;

– интервал глубин 55–54 м начинается (снизу вверх) с черных глин, аномально обогащенных рением (до 20 г/т). Венчает рудный интервал кремнистый горизонт, мощностью до первых десятков сантиметров, сложенный крупнозернистыми (до грубозернистых) песками. Пески насыщены гравийными обломками кварца, кремней, реже встречаются обломки окремнелых известняков, содержащих кораллы поздневизейско–серпуховского возраста (*Chaetetes teniradiatus* Sokolov и *Dubinophyllum* sp. – определения О.Л. Коссовой, ВСЕГЕИ). К грубозернистому прослою приурочен тонкий базальный(?) горизонт окремнения мощностью 5–10 см – сплошной, вплоть до образования массивных кремней, или состоящий из отдельных, но обильных его желваков (Карась и др., 2017).

В латеральном направлении темно-серые разности пород замещаются светло-серыми и “выбеленными” породами. Окраска последних в основном первичная и связана с отсутствием органических остатков и пирита, но бывает обусловлена и вторичными процессами. В последнем случае, среди осветленных песков встречаются

реликты уплотненных песчаников и глин желтой или оранжевой окраски, вероятно обусловленной окислением сульфидов с образованием Fe-гидроксидов.

Рудные зоны месторождения приурочены в основном к отложениям потоковых и пойменных фаций – песчаным породам, насыщенным органикой (обломки угля, достигающие мелкогравийной размерности), многочисленными маломощными прослоями глин, углистых глин и углей. Повышенные и максимальные концентрации рения, а также урана и молибдена, особенно тесно ассоциируют с горизонтами углей или углистых пород (рис. 3.8–3.10). В связи с этим можно предположить и тесную связь Re с углистым детритом, в котором постоянно присутствуют мелкие (в основном микронные) выделения сульфидов, подробно описанные в главе V.

Перекрывающая неоген-четвертичная толща представлена чередованием песков, глин, алевроитов и пород смешанного типа, преимущественно бурой, коричневатой и желтоватой окраски. Мощность толщи варьирует от 40 до 50 м и зависит от гипсометрической позиции устья конкретной скважины. В основании толщи присутствует кремнистый горизонт мощностью до первых десятков сантиметров, который сложен песками, насыщенный гравийными, реже более крупными, обломками кремней и окремнелых известняков. К этому слою приурочен горизонт вторичного окремнения, фиксирующий верхнюю границу рудоносной толщи в большинстве разрезов (см. инт. 55-54 м скв. П-3). В то же время, приуроченность оруденения исключительно к бобриковской толще результатами работ ИМГРЭ не подтверждается, так как оруденение спорадически распространяется также и в вышележащие отложения неогена (Карась и др., 2017).

Морфологию русла Скопинской палеореки, пересекавшей в визейское время территорию месторождения с юга на север (Карась и др., 2017), вероятно, определила меридиональная Двуреченско-Липецкая зона тектонических нарушений: она контролировала позицию эрозионной депрессии, в которой локализовался основной поверхностный водоток общей северной ориентировки. Характер меандрирования палеореки определялся неровным палеорельефом, главным образом, существованием системы поперечных уступов и валообразных растущих поднятий, ориентированных в юго-восточном и восток–юго-восточном направлениях (Государственная ..., 2015). С ними связано усиленное меандрирование реки перед очередным уступом или поперечным поднятием и вариации в скорости ее водотока, резко ускорявшегося, а затем

постепенно замедлявшегося после его преодоления. В период ранневизейского осушения территории 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.

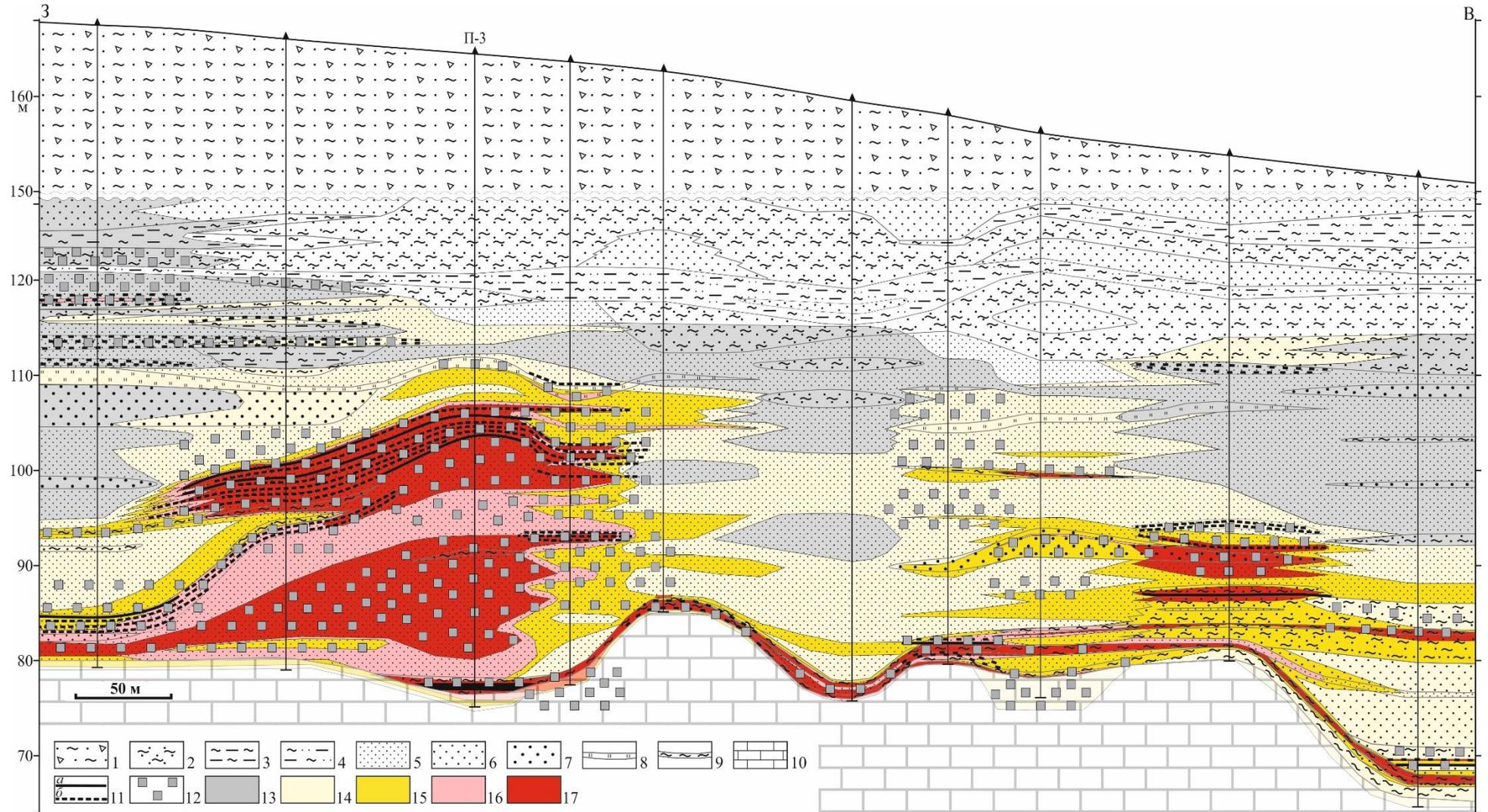
### **3.3 Характеристика рудных тел Брикетно-Желтухинского месторождения**

На Брикетно-Желтухинском месторождении по содержанию 0.1 г/т Re в породах, принятому в качестве бортового, была оконтурена практически единая рудная залежь, прослеживаемая в пределах всей площади, изученной при оценочном бурении (Карась и др., 2016, 2017; Кайлачаков, 2016, 2017). В плане залежь представляет собой слабоизвилистую субгоризонтальную ленту, протягивающуюся с севера на юг (рис. 3.6). В пределах залежи выделяются следующие типы рудных тел:

1) субпластовые, линзовидные тела с горизонтальным и пологим залеганием, мощностью от первых до нескольких метров и протяженностью до первых сотен метров; они находятся в пределах интервалов, сложенных песками серой окраски (рис. 3.8-3.15);

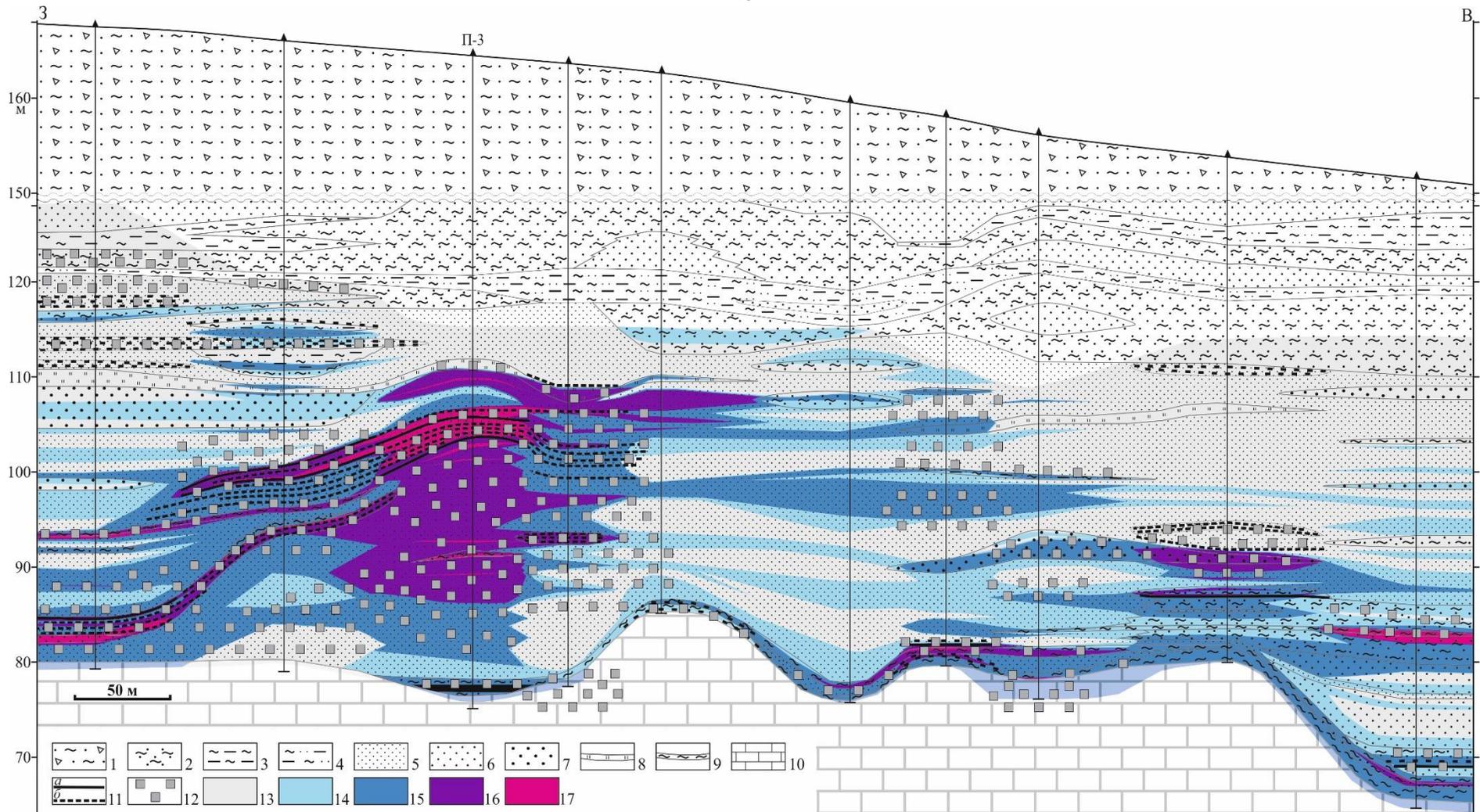
2) отдельные тонкие (от 5 см до первых десятков см) прослой углей и иногда серых глин с высокими концентрациями Re (выше 1 г/т);

3) рудные тела мощностью до первых метров, расположенные вблизи кровли фаменских известняков и повторяющие форму его поверхности; в ложбинах и впадинах этой поверхности мощности рудных тел заметно увеличиваются. Такие тела образовались в высокопроницаемых разномеристых песках базального горизонта бобриковской свиты, насыщенных углистым детритом, выше водоупорных известковистых глин, залегающих в кровле подстилающей толщи фаменских известняков.



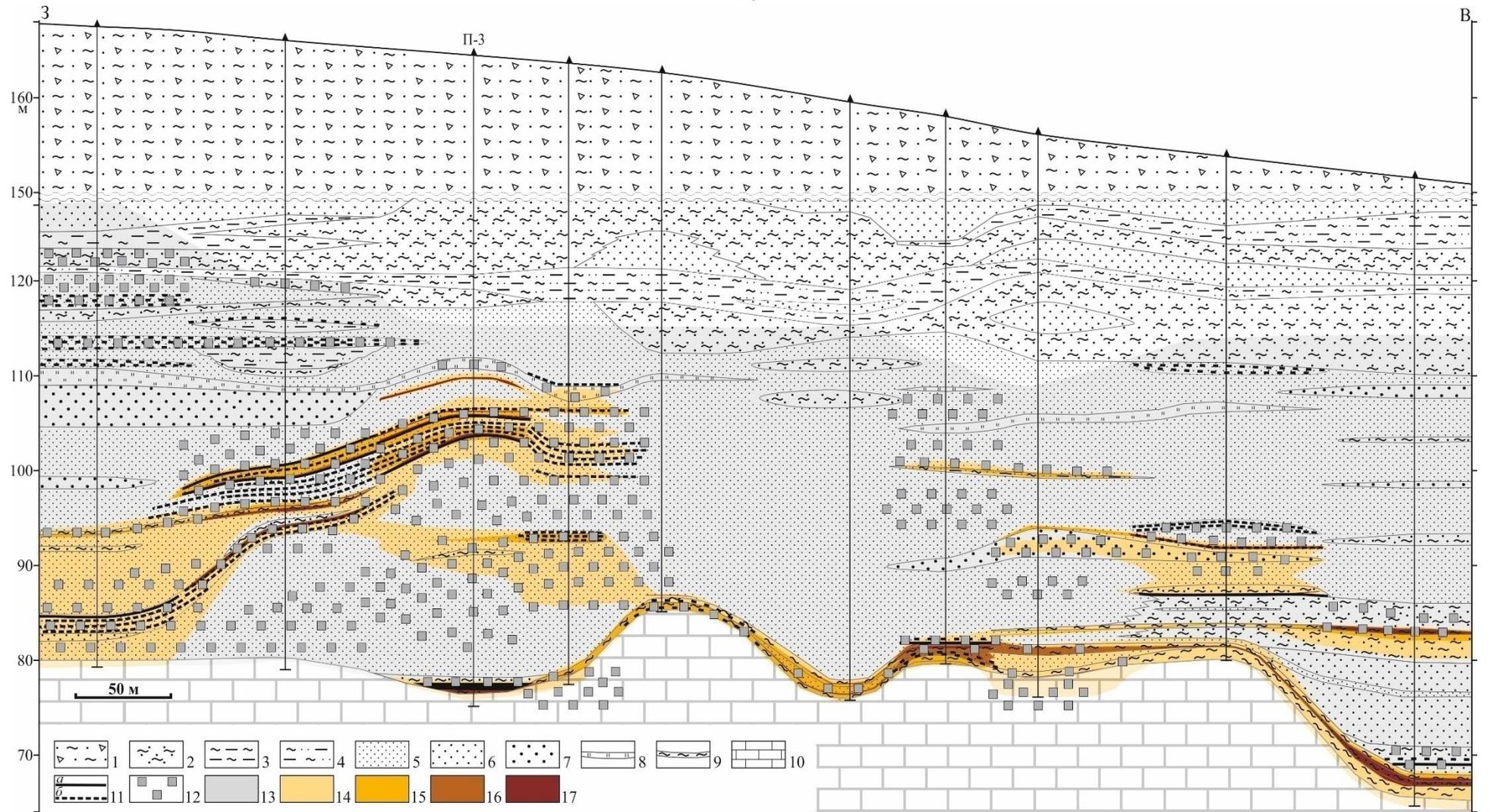
**Рис. 3.8.** Разрез рудоносной бобриковской толщи по линии I-I (рис. 3.6) и распределение **Re** в породах (по Карась и др., 2017) с уточнениями и дополнениями.

1 – N–Q песчано-глинистые отложения; 2–9 – бобриковская свита (нижний–средний визе): 2 – глины плотные песчаные с прослоями песков, 3 – переслаивание алевролитов и глин, 4 – переслаивание песков, алевролитов, глин, 5 – пески мелкозернистые, 6 – пески среднезернистые, 7 – пески крупнозернистые, 8 – прослой кремней, 9 – карбонатные глины в кровле толщи известняков; 10 – известняки (фамен); 11 – угли (*a* – прослой, *b* – обломки); 12 – сульфиды; 13–17 – содержание **Re**, г/т (13 – <0.01; 14 – <0.1; 15 – <0.5; 16 – <1.0; 17 – >1.0).



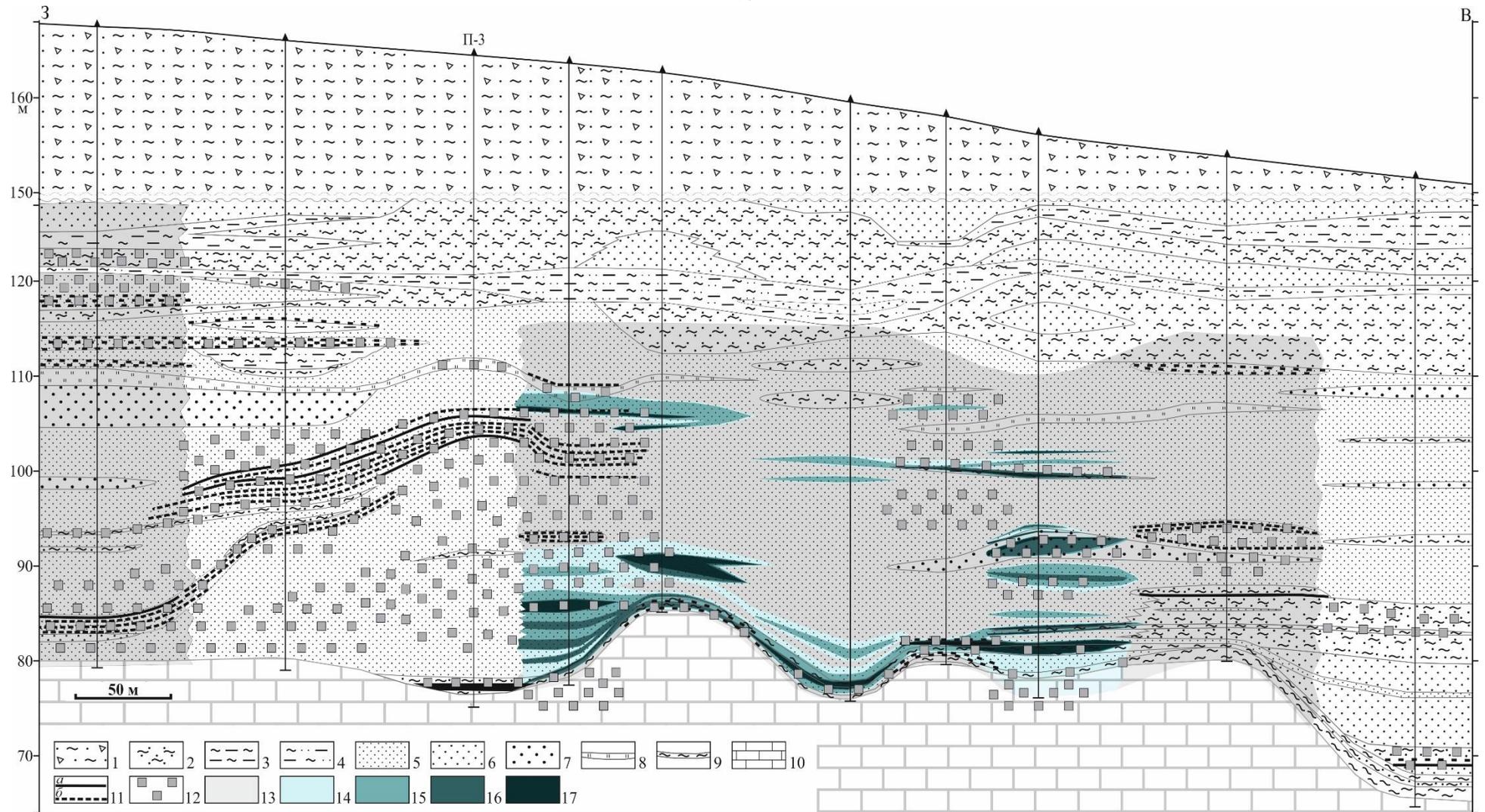
**Рис. 3.9.** Разрез рудоносной бобриковской толщи по линии I-I (рис. 3.6), распределение **Mo** в породах (по Карась и др., 2017) с уточнениями и дополнениями.

1 – N–Q песчано-глинистые отложения; 2–9 – бобриковская свита (нижний–средний визе): 2 – глины плотные песчаные с прослоями песков, 3 – переслаивание алевролитов и глин, 4 – переслаивание песков, алевролитов, глин, 5 – пески мелкозернистые, 6 – пески среднезернистые, 7 – пески крупнозернистые, 8 – прослой кремней, 9 – карбонатные глины в кровле толщи известняков; 10 – известняки (фамен); 11 – угли (а – прослой, б – обломки); 12 – сульфиды; 13–17 – содержание **Mo**, г/т (13 – <3; 14 – <10; 15 – <30; 16 – <100; 17 – >100).



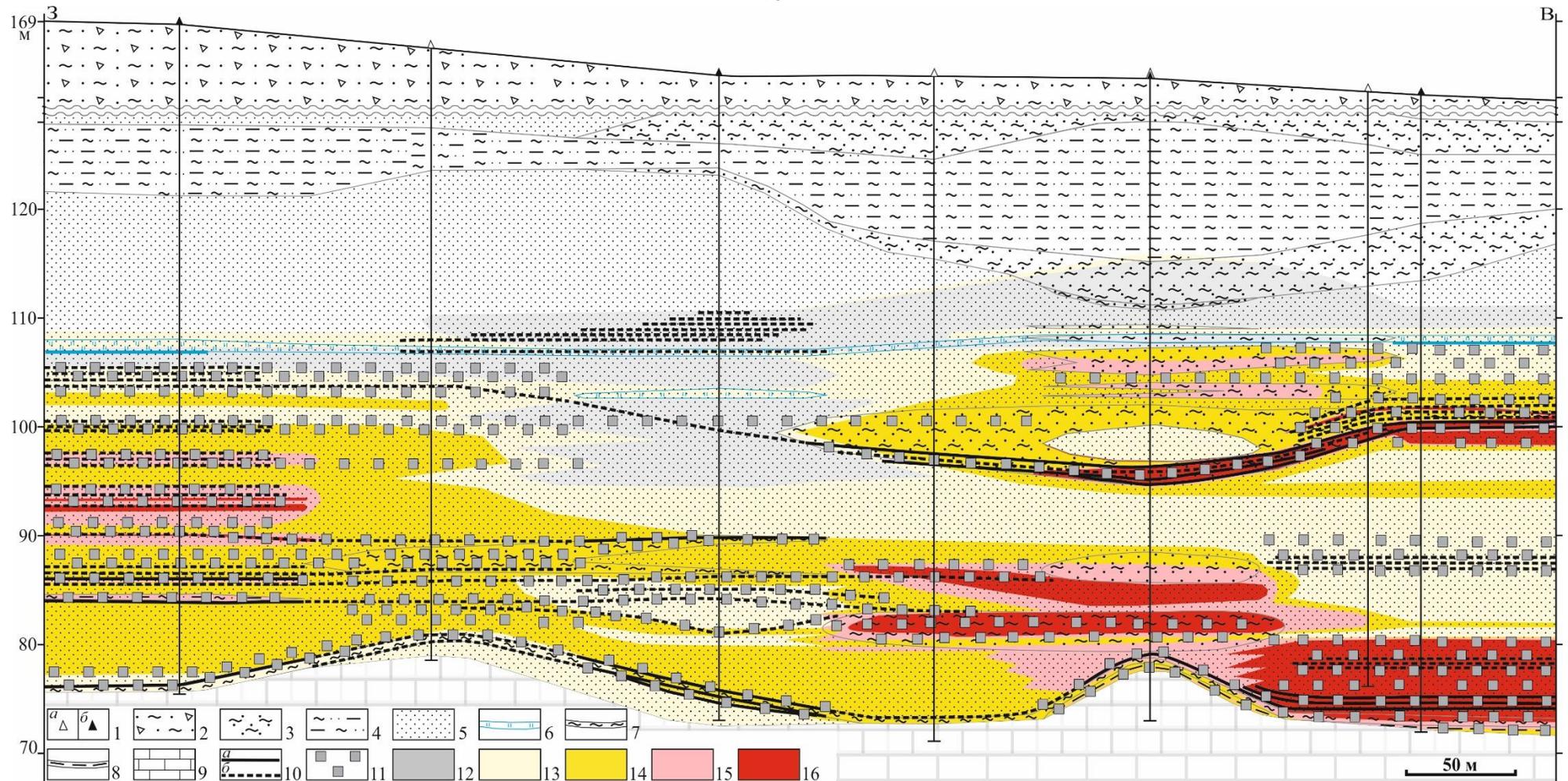
**Рис. 3.10.** Разрез рудоносной бобриковской толщи по линии I-I (рис. 3.6), распределение U в породах (по Карась и др., 2017) с уточнениями и дополнениями.

1 – N-Q песчано-глинистые отложения; 2–9 – бобриковская свита (нижний–средний визе): 2 – глины плотные песчаные с прослоями песков, 3 – переслаивание алевролитов и глин, 4 – переслаивание песков, алевролитов, глин, 5 – пески мелкозернистые, 6 – пески среднезернистые, 7 – пески крупнозернистые, 8 – прослой кремней, 9 – карбонатные глины в кровле толщи известняков; 10 – известняки (фамен); 11 – угли (a – прослой, б – обломки); 12 – сульфиды; 13–17 – содержания U, г/т (13 – <10; 14 – <30; 15 – <100; 16 – <200; 17 – >200).



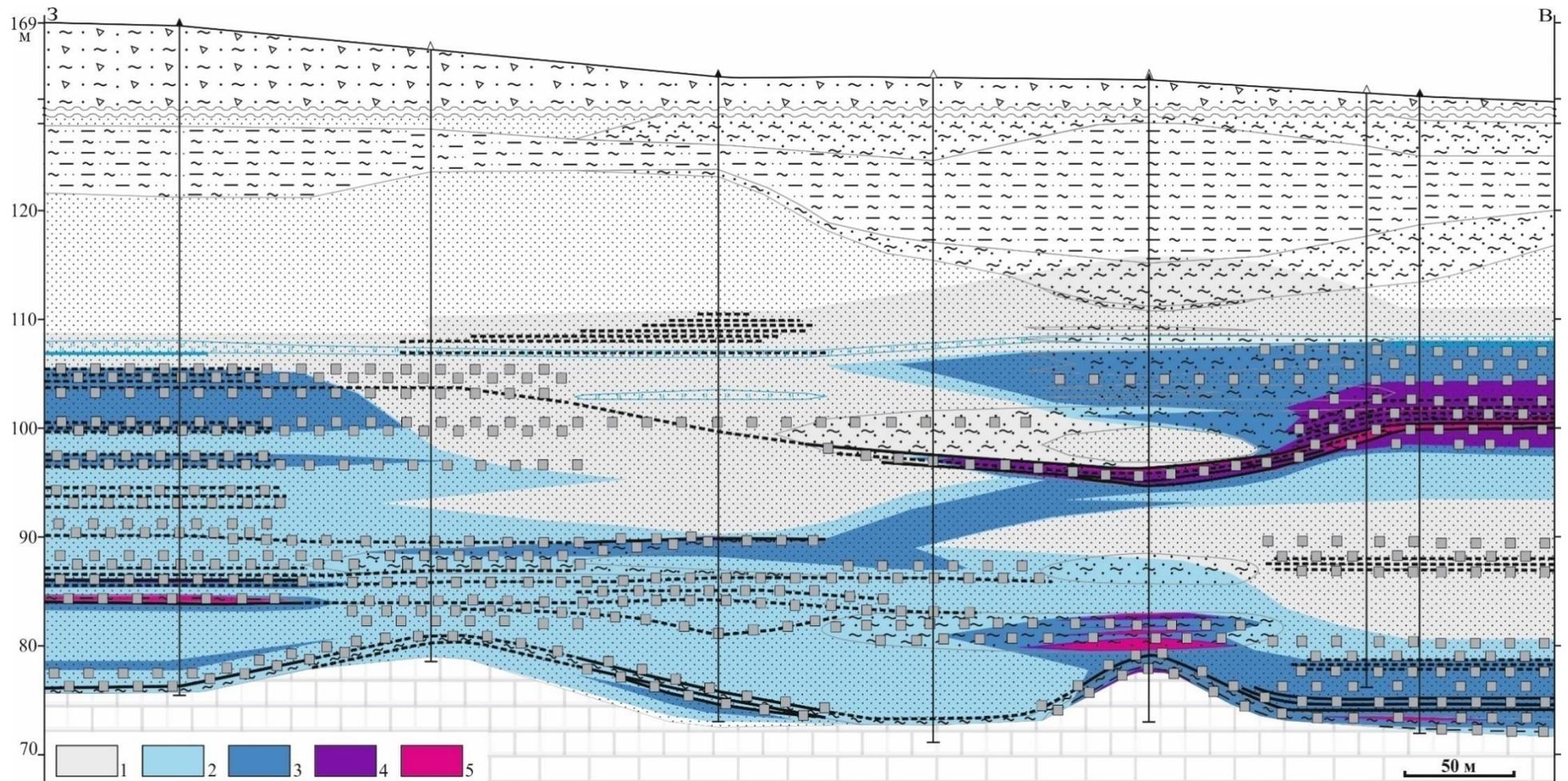
**Рис. 3.11.** Разрез рудоносной бобриковской толщи по линии I-I (рис. 3.6), распределение Se в породах (по Карась и др., 2017) с уточнениями и дополнениями.

1 – N-Q песчано-глинистые отложения; 2–9 – бобриковская свита (нижний–средний визе): 2 – глины плотные песчаные с прослоями песков, 3 – переслаивание алевролитов и глин, 4 – переслаивание песков, алевролитов, глин, 5 – пески мелкозернистые, 6 – пески среднезернистые, 7 – пески крупнозернистые, 8 – прослой кремней, 9 – карбонатные глины в кровле толщи известняков; 10 – известняки (фамен); 11 – угли (a – прослой, б – обломки); 12 – сульфиды; 13–17 – содержания Se, г/т (13 – <0.5; 14 – <30; 15 – <100; 16 – <200; 17 – >200).

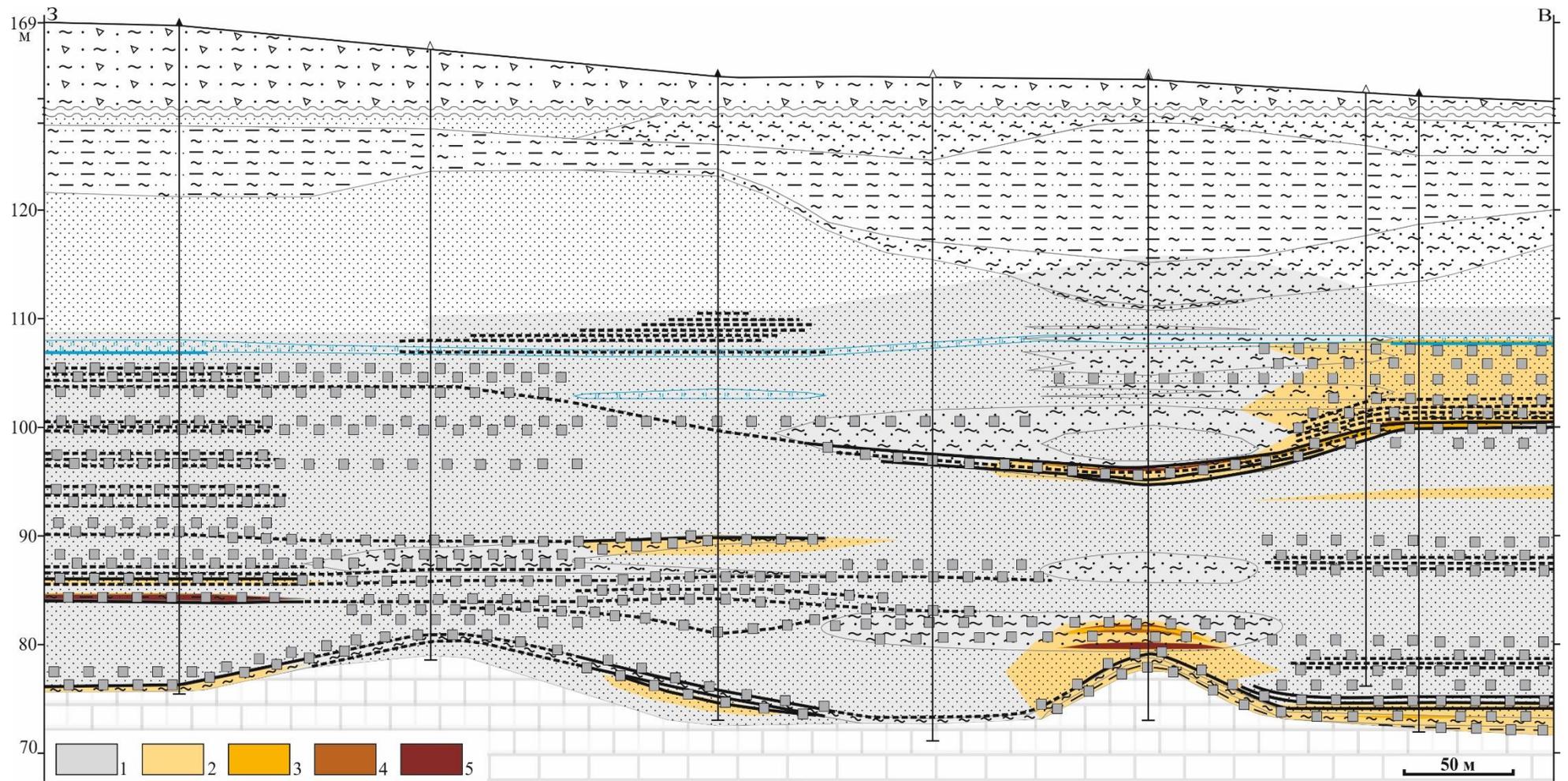


**Рис. 3.12.** Разрез рудоносной бобриковской толщи по линии II-II (рис. 3.6) и распределение **Re** в породах.

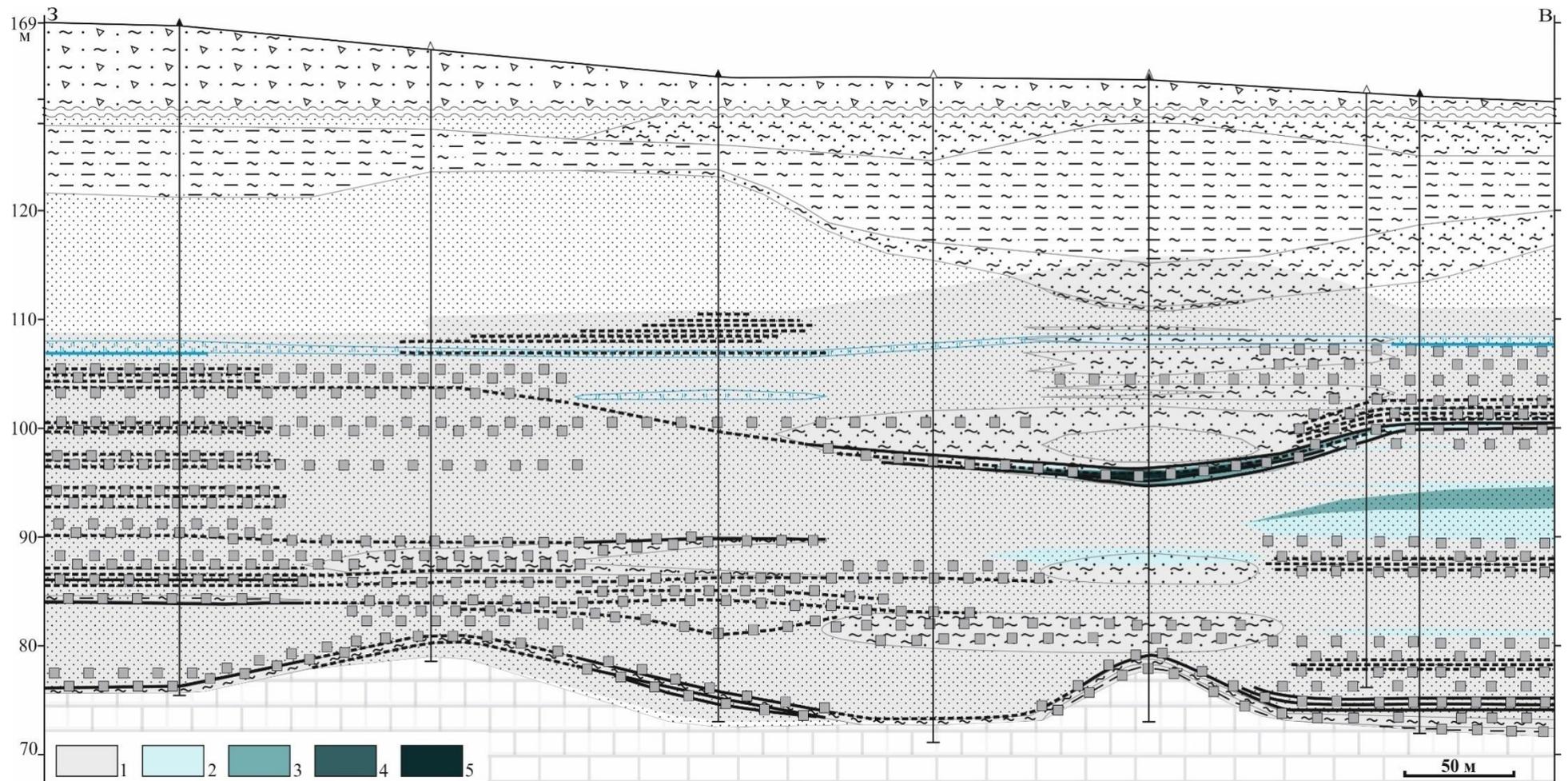
1 – скважины (*a* – УранГео, ранее; *б* – ИМГРЭ), 2 – N–Q песчано-глинистые отложения; 3–8 – бобриковская свита (нижний–средний висте): 2 – глины плотные песчаные с прослоями песков, 3 – переслаивание алевролитов и глин, 4 – переслаивание песков, алевролитов, глин, 5 – пески мелкозернистые, 6 – прослой кремней, 7 – карбонатные глины в кровле толщи известняков; 8 – карбонатные алевролиты в кровле толщи известняков; 9 – известняки (фамен); 10 – угли (*a* – прослой, *б* – обломки); 11 – сульфиды; 12–16 – содержание **Re**, г/т (12 – <0.01; 13 – <0.1; 14 – <0.5; 15 – <1.0; 16 – >1.0).



**Рис. 3.13.** Разрез рудоносной бобриковской толщи по линии П–П (рис. 3.6) и распределение **Mo** в породах (легенда – см. рис. 3.12).  
1–5 – содержание **Mo**, г/т (1 – <3; 2 – <10; 3 – <30; 4 – <100; 5 – >100).



**Рис. 3.14.** Разрез рудоносной бобриковской толщи по линии II-II (рис. 3.6) и распределение U в породах (легенда – см. рис. 3.12).  
1–5 – содержания U, г/т (1 – <10; 2 – <30; 3 – <100; 4 – <200; 5 – >200).



**Рис. 3.15.** Разрез рудоносной бобриковской толщи по линии II-II (рис. 3.6) и распределение Se в породах (легенда – см. рис.3.12).  
1–5 – содержания Se, г/т (1 – <0.5; 2 – <30; 3 – <100; 4 – <200; 5 – >200).

Все перечисленные рудные тела в совокупности образуют рудную залежь, которая по своей морфологии напоминает мощную с раздувами ленту, внутри которой выделяются отдельные сближенные рудные тела субпластовой формы с концентрациями  $Re > 0.5$  г/т. Мощность рудной залежи составляет в среднем  $\sim 5\text{--}8$  м, достигая в раздувах  $15\text{--}42$  м. Ширина этой субгоризонтальной ленты составляет  $500\text{--}700$  м, а длина в пределах детально изученного участка –  $1400$  м; общая вероятная ее протяженность – свыше  $2$  км. Утвержденные запасы на Брикетно-Желтухинском месторождении составили  $23$  т рения по категории  $C_2$  (Карась и др., 2017; Кайлачаков, 2018).

$S_{орг}$  в песках изменяется в широких пределах: от  $0.0n$  % в уплотненных “выбеленных” песках и до  $\sim 10\%$  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 (рис. 3.5, 3.6). Оруденение, оконтуренное по среднему содержанию  $Re = 0.5$  г/т, достигает  $30$  м мощности (Карась и др., 2017; Левченко и др., 2019). Максимальные содержания  $Re$  зафиксированы в углисто-глинистых пропластках мощностью  $5\text{--}10$  см ( $40\text{--}637$  г/т), причем наиболее высокие содержания приурочены к слойкам этих пород, залегающим в кровле и, местами, в подошве рудной залежи. В песках содержания  $Re$  достигают  $10\text{--}50$  г/т (Спиридонов и др., 2016; Карась и др., 2017)

Несмотря на общий, близкий к стратиформному типу, характер рудной залежи, который отмечали предыдущие исследователи (Спиридонов и др., 2016; Карась и др., 2016, 2017; Кайлачаков, 2016), обращают на себя внимание развитые в ее пределах структурные элементы, нарушающие послойное распределение полезных компонентов. В отдельных поперечных разрезах субгоризонтальное залегание песчаной толщи осложнено раздувами, связанными с увеличением мощности отдельных горизонтов песков. Эти раздувы обусловлены прогибами подошвы бобриковского горизонта (в понижениях кровли подстилающих фаменских известняков), и соответствующими куполообразными выгибаниями над ними слоев вышележащей песчаной толщи, маркируемых прослоями углей (рис. 3.8 – 3.11). Такие гребне- и куполовидные изгибы слоистости могли быть вызваны постседиментационными деформациями рудовмещающей толщи, природа которых пока не ясна. С учетом того, что отложения бобриковской свиты в настоящее время

являются преимущественно слабо литифицированными и, следовательно, были такими и в прошлые геологические эпохи – нельзя исключить, что указанные куполовидные структуры имеют гидротермально-гидравлическую природу. При совмещении в плане прогибов подошвы рудовмещающей толщи и “гребней” воздымания вышележащих слоев, ближе к кровле бобриковской толщи, возникают своеобразные биклиналильные структуры (например, в районе скв. П-3, рис. 3.8). Важно, что именно эти участки раздувов мощности песков обусловили появление не только морфологических, но и концентрационных рудных столбов. Поэтому изученных нами разрезах присутствуют субвертикальные участки повышенных и максимальных содержаний металлов, особенно отчетливо выраженные в картинах распределения Re и Mo (рис. 3.8, рис. 3.9). При этом такое же распределение характерно для сгущений рассеянно-вкрапленной пиритизации, тяготеющей к вышеупомянутым «столбам». Важно 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. Тогда логично предположить, что сложившаяся таким образом низкотемпературная гидротермально-гидравлическая система обусловила формирование этих куполовидных морфоструктур.

В результате проведенных геологических исследований и анализа распределения рудных компонентов Re, Mo, U, Se по профилям разрезов (данные опробования скважин), выявлены куполовидные морфоструктуры (раздутия) рудовмещающей бобриковской толщи, которые рассматриваются как следствие постседиментационных деформаций толщи. Наряду с ролловыми рудными телами, выявлены концентрационные рудные столбы и установлены структурные элементы, задающие такую морфологию.

Приведённые выше результаты исследований и анализ фактического материала обосновывают *первое защищаемое положение*:

**В субгоризонтально залегающей рудовмещающей песчаной толще (бобриковский горизонт, висте) 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.**

## ГЛАВА IV. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РУД

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 (Карась и др., 2016; Викентьев, Кайлачаков, 2020).

### 4.1. Геохимические исследования руд месторождения

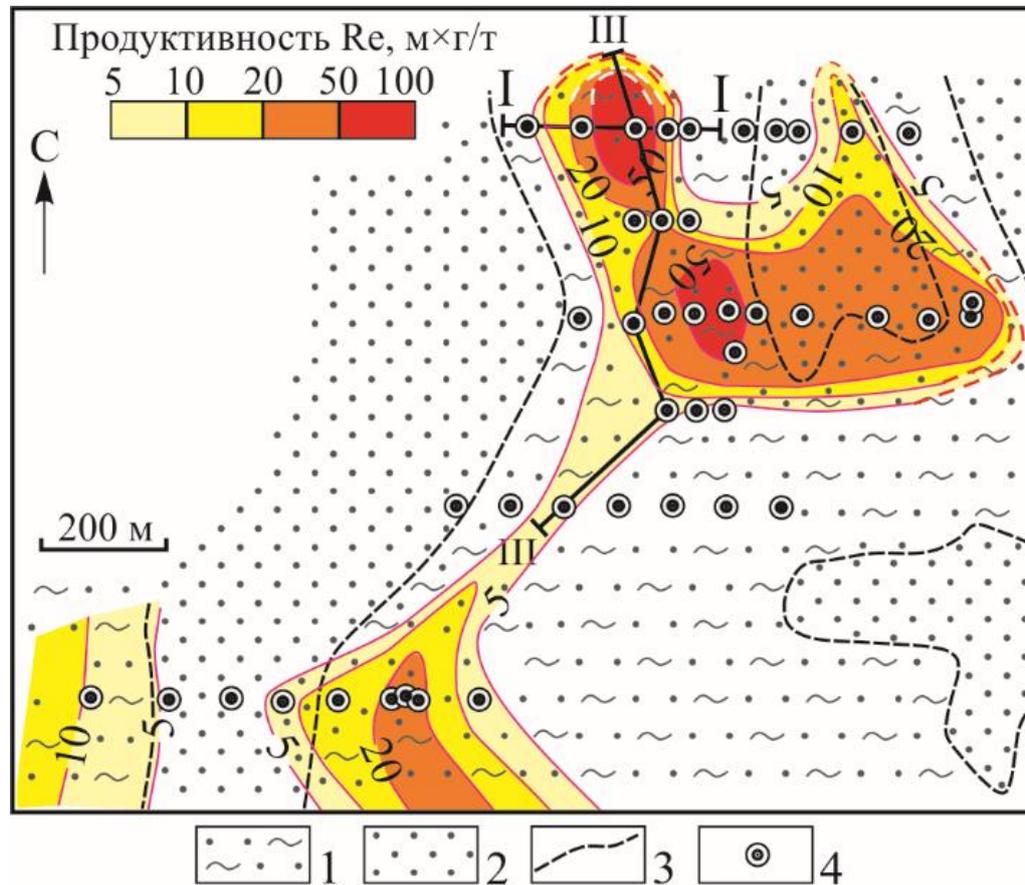
Рудовмещающие пески месторождения характеризуются высоким содержанием  $\text{SiO}_2$  (до 95 масс. %), в зонах пиритизации обычно в заметных концентрациях присутствуют Fe и S (табл. 4.1). Повышенные содержания характерны для U, Mo, Se и Re (с учетом крайне высокой степени рассеяния последнего в литосфере), и для спутников рудных элементов –V, Co, Ni, Zn, As (табл. 4.2).

Максимальное вертикальное распространение рениевой минерализации, ореол которой оконтурен по бортовой концентрации ( $C_{\text{Re}} = 0.5$  г/т), составляет 42 м, Ореолы рениевой минерализации включают ореолы молибденовой и урановой минерализации, что свидетельствует о геохимическом сходстве поведения U, Mo и Re в породах и рудах месторождения (рис. 4.1, 4.2, 4.11) (Глава III, рис. 3.8–3.10). Интервалы разреза с максимальными концентрациями урана, молибдена и рения 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 месторождения присутствует в нескольких формах.

Зона распространения молибденового оруденения, оконтуренная по бортовой концентрации  $C_{\text{Mo}} = 50$  г/т, практически совпадает с зоной урановой минерализации, а максимальные концентрации Mo и U установлены в одних и тех же интервалах разреза.

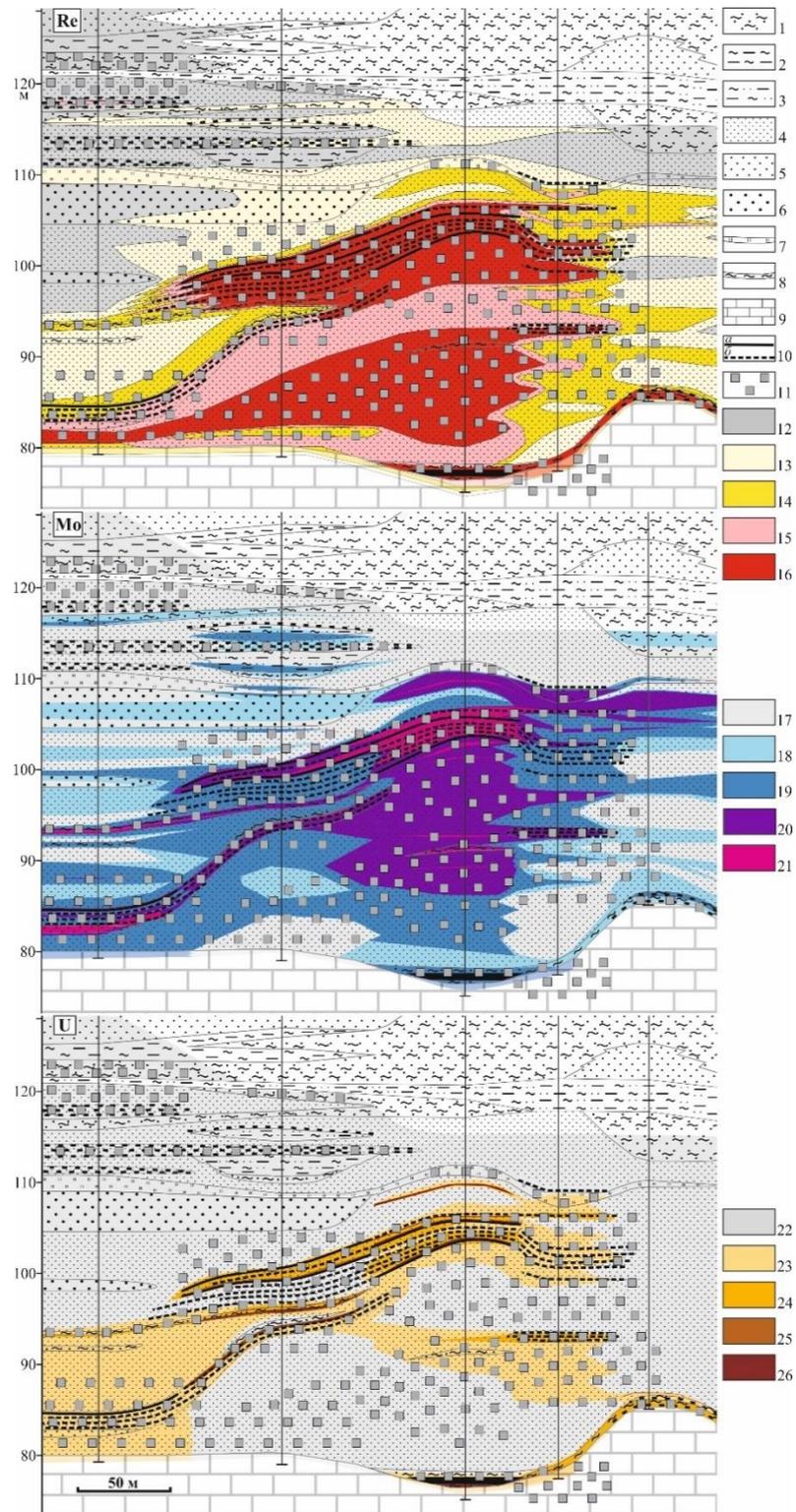
Ореол селеновой минерализации, оконтуренный по бортовому содержанию селена  $C_{\text{Se}} = 18$  г/т, прослеживается в верхней части зоны комплексного оруденения, иногда он располагается между интервалами с повышенным содержанием урана, и часто распространяется в светлые серые пески с низким содержанием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

По данным химических анализов, в керновых пробах, помимо промышленных концентраций основных рудных элементов Re, Mo и 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 увеличивается содержание в песках  $C_{орг}$  (от 0.01–0.5 до 1–10 масс. %) и концентрации сульфидов (от первых процентов до 20–30 об. %).



**Рис. 4.1.** Изолинии продуктивности рениевого оруденения в бобриковской свите Брикетно–Желтухинского месторождения на литолого-фациальной схеме, по (Карась и др., 2016, 2017) с изменениями и дополнениями. I-I и III-III – линии разреза.

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



**Рис. 4.2.** Фрагмент разреза по линии I-I (рис. 4.1) богатой рудоносной толщи и распределение концентраций Re, Mo, U (г/т), по (Карась и др., 2017) с уточнениями и дополнениями.

1 – глины плотные песчаные, с прослоями песков; 2 – переслаивание алевролитов и глин; 3 – переслаивание песков, алевролитов, глин; 4 – пески мелкозернистые; 5 – пески среднезернистые; 6 – пески крупнозернистые; 7 – прослой кремней; 8 – карбонатные глины, развитые по известнякам; 9 – известняки; 10 – угли: а – прослой, б – обломки; 11 – сульфиды; 12–16 – содержание **Re**, (12 – <0.01, 13 – 0.01- 0.1, 14 – 0.1-0.5, 15 – 0.5-1.0, 16 – >1.0); 17–21 – содержание **Mo**, (17 – <3, 18 – <10, 19 – <30, 20 – <100, 21 – >100); 22–26 – содержание **U**, (22 – <10, 23 – <30, 24 – <100, 25 – <200, 26 – >200).

**Таблица 4.1.** Содержание петрогенных элементов (масс. %) в рудах Брикетно-Желтухинского месторождения по данным рентгено-флуоресцентного анализа

№ обр.	Литологическая характеристика	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	п.п.п.	Σ
BZ-1	песок средне-крупнозернистый темно-серый, глинистый, обводненный	0.18	0.22	1.6	90.63	0.15	0.11	0.13	0.02	2.26	0.03	0.87	3.65	99.85
BZ-2	песок крупнозернистый темно-серый	0.13	0.16	1.24	92.37	0.08	0.06	0.11	0.01	1.95	0.02	0.77	2.98	99.88
BZ-3	песок средне-крупнозернистый темно-серый	0.13	0.16	1.18	92.37	0.08	0.06	0.11	0.01	2.11	0.02	0.78	2.87	99.88
BZ-4	пески средне-крупнозернистые темно-серые, сильноглинистые, с многочисленными пропластками угля (мощн. первые см) и сульфидными стяжения неправильной формы; реже удлиненные и уплощенные сульфидные стяжения (разм. первые мм)	0.08	0.13	2.66	79.73	0.15	0.18	0.19	0.01	2.97	0.03	4.06	9.31	99.50
BZ-5	песок средне-крупнозернистый темно-серый, сильно обводненный	0.18	0.19	1.25	87.51	0.1	0.1	0.12	0.01	2.64	0.03	1.48	6.17	99.78
BZ-6	песок крупнозернистый темно-серый	0.13	0.15	0.93	91.89	0.07	0.06	0.11	0.02	2.5	0.02	0.77	3.24	99.89
BZ-7	песок средне-крупнозернистый серый до темно-серого	0.12	0.13	0.56	93.59	0.07	0.04	0.07	0.01	2.29	0.02	0.76	2.26	99.92
BZ-8	равномерное переслаивание песков среднезернистых темно-серых и серых (мощн. прослоев от 0.5 до 1 см)	0.12	0.12	0.96	91.43	0.07	0.04	0.11	0.01	2.33	0.02	1.13	3.56	99.90
BZ-9	песок среднезернистый коричневатого-серый до серого, с обломками угля (содержание до первых об. %) размерностью в первые мм и сульфидными стяжениями размерностью до нескольких мм	0.16	0.16	1.02	94.25	0.09	0.09	0.09	0.01	1.4	0.03	0.5	2.12	99.92
BZ-10	песок среднезернистый коричневатого-серый с обломками угля крупнозернистой размерности; тонкое переслаивание угля и сульфидных прослоев	0.15	0.14	0.91	86.72	0.08	0.08	0.08	0.01	3.39	0.02	2.02	6.11	99.71
BZ-11	песок среднезернистый коричневатого-серый	0.17	0.15	0.81	95.25	0.09	0.09	0.08	0.01	1.36	0.02	0.44	1.48	99.95
BZ-12	уголь черный, с прослойками сульфидов (мощн. 1-2 мм)	0.05	0.11	4.4	23.43	0.23	0.49	0.31	0.02	6.59	0.16	13.2	46.3	95.35
BZ-13	глина темно-серая	0.11	0.29	14.9	71.44	0.27	0.22	1.04	0.01	2.49	0.04	0.97	7.84	99.61
BZ-14	алеврит темно-серый до черного с сульфидами послойными (мощн. слойков до 1 мм)	0.14	2.26	13.3	36.97	1.89	2.24	0.72	0.05	10.29	0.84	4.25	26.7	99.63
BZ-15	переслаивание угля и песка разнозернистого (от мелко- до крупнозернистого) темно-серого, прослойки до 1 см	0.09	0.82	7.84	50.1	0.98	2.61	0.36	0.03	5.45	0.9	8.6	21.7	99.50
BZ-16	песок среднезернистый серый	0.11	0.31	4.52	70.27	0.06	0.33	0.27	0.03	7.29	0.03	4.4	12.3	99.90
BZ-17	переслаивание песка мелко-среднезернистого, темно-серого, иногда почти черного, и глины темно-серой до черной окраски (мощн. прослоев 2-3 см)	0.16	1.24	10.4	48.27	1.09	2.81	0.5	0.04	9	2.02	5.05	19.2	99.76
BZ-18	песок мелко-среднезернистый темно-серый	0.18	3.53	2.96	72.92	0.26	5.37	0.19	0.04	3.97	0.19	1.71	8.58	99.90
BZ-19	алеврит темно-серый до черного, тонкослоистый, с обломками известняков	0.12	5.99	8.54	49.17	4.73	8.59	0.38	0.08	4.42	0.61	2.07	15.2	99.92
BZ-20	переслаивание доломитов серых и темно-серых сульфидизированных (мощн. слойков 1 мм)	0.09	16.89	0.68	2.91	0.34	31.9	0.02	0.1	0.86	0.05	0.44	43.2	97.49

Примечание. п.п.п. – потери при прокаливании; здесь и в табл. 3 аналитик А.И. Якушев (ИГЕМ РАН).

**Таблица 4.2.** Содержание редких и рассеянных элементов (г/т) в рудах Брикетно-Желтухинского месторождения по данным рентгено-флуоресцентного анализа

№ п/п	№ обр.	Cr	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ba	U	Th	Y	Nb	Pb	As	Mo	Ce	Sc	Ga	Se	Re
1	BZ-1	26	69	72	89	23	362	82	37	-	14	-	-	87	154	-	-	-	-	4.83*
2	BZ-2	20	84	43	49	24	337	70	24	-	12	-	-	69.5	76	-	-	-	-	4.71*
3	BZ-3	16	44	62	66	30	255	69	34	-	9	-	-	77	146	-	-	-	-	5.49*
4	BZ-4	42	106	742	759	36	579	74	150	-	41	-	45	272	1360	51	10	-	-	29.4* (150)
5	BZ-5	32	170	99	111	13	728	72	71	-	24	-	-	124	88	-	11	-	-	5.93*
6	BZ-6	20	94	38	34	11	367	67	23	-	14	-	-	49.5	34	-	11	-	-	3.32*
7	BZ-7	12	24	64	51	12	126	61	46	-	5	-	-	125.5	38	-	-	-	-	4.58*
8	BZ-8	14	60	66	68	-	197	70	32	-	9	-	-	111	49	-	-	-	-	6.68*
9	BZ-9	-	56	41	38	-	259	65	15	-	10	-	-	26	33	-	10	-	-	11.3
10	BZ-10	10	49	503	620	22	189	64	112	-	10	-	-	304	67	-	-	-	39	21.3
11	BZ-11	-	24	43	44	-	98	79	11	-	5	-	-	25	-	-	-	-	24	3.44
12	BZ-12	313	402	2699	3517	44	2704	140	2460	27	183	-	886	1574	30140	432	39	45	653	583* (570)
13	BZ-13	110	316	78	119	75	34	91	49	14	31	19	193	17.5	22	80	11	20	832	10.5
14	BZ-14	138	120	55	141	49	73	83	921	14	92	30	78	222	211	155	15	34	67	9.83
15	BZ-15	76	71	39	67	30	61	51	580	-	65	-	24	211	30	98	14	17	34	90.2
16	BZ-16	36	49	37	38	14	103	50	40	-	6	-	16	93.5	24	24	-	-	41	8.08
17	BZ-17	86	83	44	83	35	54	74	345	11	168	24	44	141.5	61	216	15	25	47	10.1
18	BZ-18	29	41	17	28	22	50	72	61	-	15	-	13	60.5	23	44	-	-	25	6.22
19	BZ-19	55	50	20	43	25	50	88	42	-	14	9	29	41	25	77	11	11	-	5.09
20	BZ-20	15	-	-	11	-	17	34	10	-	-	-	-	22	30	28	18	-	-	0.75

Примечание: \* Re определен методом кинетического анализа (аналитик Г.Г. Лебедева, ИМГРЭ), в скобках – данные рентгено-флуоресцентного анализа, Re в остальных пробах определен методом ICP-MS (аналитик И.А. Пичугин, ИМГРЭ); прочерк – содержание ниже предела обнаружения (п.о.). Содержание Sb, Cd, Sn, Bi, La в проанализированных пробах ниже п.о. (Sb, Cd, Sn, Bi <10 г/т; La <30 г/т), за исключением проб: BZ-14 (La – 58 г/т) и BZ-13 (Cd – 62 г/т).

## 4.2. Статистическая обработка результатов опробования руд месторождения

При статистической обработке результатов химического анализа 2866 проб, содержащихся в базе геохимических данных месторождения, включающей анализ коэффициентов парной корреляции элементов (рис. 4.3, табл. 4.3), была выявлена значимая положительная корреляция содержаний рения с содержанием большинства химических элементов рудной ассоциации. Максимальные значения коэффициента корреляции (R) с **Re** были установлены для элементов: Mo, Ag, Zn, U, Se, Co; несколько меньшие значения коэффициента корреляции Re с Tl, As, Y, Ni, V, S и Pb. Близкие особенности поведения установлены для урана. Концентрации U в рудах месторождения так же, как Re, обнаруживают положительную корреляционную связь с концентрациями Mo, S и Se (см. табл. 4.3).

**Таблица 4.3.** Корреляционные связи основных компонентов руд по данным химических анализов (2866 проб)

Компонент руд	Химические элементы, расположенные в порядке снижения коэффициента корреляции (R) с данным компонентом руд
Re	<b>Mo, Ag, Zn, U, Se, Co, Tl, As, Y, Ni, V, S, Pb</b>
U	<b>Re, Mo, As, Y, Tl, S, Ni, Zn, Ag, Cd, Fe, V, Se</b>
Mo	<b>Re, Zn, U, Co, Y, Th, Ni, As</b>
Se	<b>Pb, V, Ag, Re, Y, Cu, Co, Ni, Cr, Tl</b>
S	<b>Fe, Tl, As, Co, Ni, V, Ag, P, Y, U, Sr, Th, Al, Zn, Cd, Bi, Pb, Mg, Re, Se</b>

Примечание: жирный шрифт –  $R > 0.4$

	Re	U	Mo	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Cd	Sb	Tl	Pb	Bi	Th	Ag	Ti	Zr	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Y	
Re	1																															
U	0.42	1																														
Mo	0.93	0.41	1																													
V	0.24	0.23	0.06	1																												
Cr	0.10	0.15	0.06	0.43	1																											
Mn	0.01	0.02	0.01	0.00	0.04	1																										
Fe	0.16	0.27	0.10	0.35	0.22	0.13	1																									
Co	0.42	0.31	0.32	0.45	0.22	0.07	0.39	1																								
Ni	0.28	0.33	0.20	0.39	0.22	-0.02	0.37	0.80	1																							
Cu	0.13	0.10	0.06	0.37	0.21	-0.01	0.23	0.24	0.18	1																						
Zn	0.47	0.31	0.45	0.27	0.18	0.00	0.24	0.36	0.33	0.18	1																					
As	0.34	0.38	0.19	0.45	0.23	0.05	0.60	0.59	0.72	0.15	0.25	1																				
Se	0.42	0.21	0.02	0.81	0.30	-0.01	0.16	0.32	0.30	0.40	0.20	0.25	1																			
Sr	0.10	0.21	0.08	0.14	0.13	0.46	0.28	0.32	0.11	0.09	0.11	0.24	0.07	1																		
Cd	0.16	0.29	0.17	0.20	0.11	0.01	0.16	0.14	0.15	0.05	0.58	0.22	0.11	0.05	1																	
Sb	0.05	0.05	0.03	0.12	0.08	0.08	0.11	0.06	0.06	0.14	0.04	0.07	0.09	0.11	0.00	1																
Tl	0.35	0.37	0.19	0.47	0.23	0.13	0.62	0.63	0.79	0.16	0.31	0.87	0.25	0.30	0.21	0.11	1															
Pb	0.23	0.18	0.05	0.81	0.30	0.00	0.17	0.33	0.30	0.40	0.19	0.25	0.93	0.08	0.10	0.18	0.25	1														
Bi	0.11	0.16	0.13	0.34	0.29	0.05	0.35	0.17	0.18	0.23	0.19	0.17	0.14	0.21	0.04	0.19	0.29	0.16	1													
Th	0.21	0.20	0.22	0.18	0.22	0.06	0.42	0.20	0.17	0.11	0.21	0.15	0.05	0.16	0.05	0.08	0.22	0.09	0.61	1												
Ag	0.79	0.29	0.08	0.83	0.32	-0.03	0.27	0.56	0.44	0.41	0.23	0.49	0.79	0.11	0.18	0.12	0.44	0.79	0.17	0.07	1											
Ti	0.04	0.14	0.08	0.21	0.33	-0.10	0.16	0.05	0.08	0.14	0.14	0.05	0.04	0.12	0.03	0.08	0.09	0.06	0.69	0.44	0.07	1										
Zr	0.05	0.09	0.05	0.15	0.15	-0.10	0.13	0.07	0.06	0.11	0.11	0.07	0.12	-0.02	0.06	0.01	0.06	0.12	0.26	0.47	0.20	0.40	1									
Mg	0.04	0.09	0.03	0.08	0.00	0.68	0.14	0.07	0.04	-0.02	0.00	0.12	0.04	0.58	0.04	0.06	0.17	0.06	0.04	0.02	0.06	-0.07	-0.10	1								
Al	0.10	0.20	0.11	0.28	0.32	-0.02	0.34	0.16	0.16	0.16	0.18	0.20	0.10	0.22	0.09	0.12	0.26	0.12	0.61	0.34	0.18	0.69	0.28	0.04	1							
Si	-0.07	-0.14	-0.07	-0.17	-0.15	-0.57	-0.24	-0.12	-0.09	-0.05	-0.08	-0.16	-0.06	-0.57	-0.05	-0.12	-0.22	-0.09	-0.31	-0.15	-0.11	-0.23	-0.07	-0.74	-0.62	1						
P	0.07	0.21	0.05	0.14	0.07	0.19	0.35	0.14	0.09	0.07	0.06	0.21	0.05	0.48	0.05	0.09	0.27	0.07	0.16	0.23	0.07	0.11	0.04	0.28	0.20	-0.30	1					
S	0.23	0.33	0.16	0.41	0.18	0.10	0.77	0.41	0.41	0.14	0.26	0.58	0.20	0.32	0.26	0.10	0.63	0.25	0.26	0.31	0.40	0.12	0.14	0.25	0.31	-0.29	0.39	1				
K	-0.01	0.11	0.00	0.11	0.24	0.20	0.17	0.03	0.00	0.06	0.02	0.05	-0.01	0.30	0.00	0.11	0.12	0.01	0.34	0.28	0.00	0.60	0.07	0.28	0.49	-0.37	0.28	0.08	1			
Ca	0.00	0.03	0.00	0.01	-0.03	0.78	0.04	0.02	-0.01	-0.06	-0.02	0.04	0.00	0.60	0.00	0.06	0.09	0.01	0.00	-0.02	-0.01	-0.11	-0.11	0.93	-0.01	-0.75	0.26	0.13	0.19	1		
Y	0.29	0.37	0.25	0.49	0.28	0.04	0.24	0.42	0.32	0.22	0.40	0.34	0.42	0.25	0.13	0.13	0.45	0.39	0.41	0.27	0.53	0.33	0.16	0.08	0.36	-0.24	0.44	0.36	0.15	0.05	1	

Рис. 4.3. Матрица парных корреляций для совокупной выборки геохимических проб по Брикетно-Желтухинскому месторождению (2866 проб).

Нами 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  $\geq 5$  г/т (рис. 4.4, 4.5, 4.6, 4.7). В каждой группе были рассчитаны средние геометрические значения содержания элементов (табл. 4.4) и определены коэффициенты парной корреляции, значения которых сравнивались со значениями коэффициентов парной корреляции, рассчитанными для всей выборки проб (табл. 4.5).

Сравнительный анализ позволил выявить 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:

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 ( $\geq 5$  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 *карбонатных* парагенезисов: Mg, Ca, Mn. Из них только кальцием и марганцем заметно обогащены руды с максимальным содержанием рения ( $\geq 5$  г/т Re); тогда как содержание Mg в богатых рудах слабо повышено, по сравнению с рядовыми рудами (0.5–5 г/т Re) и бедными рудами (0.1–0.5 г/т Re). Однако по  $C_{Mg}$  все разности данных групп заметно уступают неоруденелым ( $Re < 0.1$  г/т) доломитам, подстилающим песчаную толщу.

**Таблица 4.4.** Минимальные, максимальные и средние содержания химических элементов в богатых (I,  $\geq 5$  г/т Re), рядовых (II, 5–0.5 г/т Re) и бедных (III, 0.5–0.1 г/т Re) рудах и минерализованных породах (IV,  $< 0.1$  г/т Re)

Элемент	I (103)			II (730)			III (635)			IV (1408)		
	min	max	X <sub>геом</sub>	min	max	X <sub>геом</sub>	min	max	X <sub>геом</sub>	min	max	X <sub>геом</sub>
Re	5.09	583	13.12	0.5	4.86	1.21	0.1	0.5	0.23	0.001	0.1	0.014
U	0.855	4679	96.24	0.616	5186	8.02	0.96	326	4.61	0.025	606	1.789
Mo	0.628	32967	100.6	0.087	4279	15.25	0.025	1600	6.45	0.024	2832	1.621
V	8.4	3409	82.68	2.64	884	15.99	1.55	586	12.79	1.65	249	12.76
Cr	10	624	69.37	2.78	346.7	25.41	0.931	2347	19.12	0.43	205	22.95
Mn	34.7	1535	134.0	32.8	3042	130.6	15.5	2583	116.5	17.6	2048	102.5
Co	4.32	940	97.96	2.18	1348	20.9	2.26	574	12.55	0.908	179	5.93
Ni	9.71	2902	129.24	4	524	32.31	3	1591	22.73	3	768	14.48
Cu	4.02	377	27.12	2.31	131	16.18	0.5	260	17.23	0.5	572	16.72
Zn	6.18	3300	144.8	0.137	3031	42.82	0.05	1676	26.74	0.05	1135	17.71
As	3.64	1048	99.75	1.84	337	19.24	2.02	1314	12.86	0.05	512	5.45
Se	0.25	3473	14.59	0.05	853	0.53	0.25	303	0.65	0.25	103	0.37
Sr	0.899	366	40.55	0.703	728	28.9	0.997	240	24.34	0.034	307	15.49
Cd	0.012	91.1	1.2	0.005	71.3	0.24	0.005	11.4	0.1	0.001	13.7	0.04
Sb	0.005	15.8	0.57	0.005	32.5	0.18	0.005	73.5	0.15	0.005	57.4	0.19
Tl	0.097	54.3	5.77	0.048	18.3	0.99	0.05	62.2	0.54	0.005	16.9	0.16
Pb	2	4597	51.59	0.456	674	8.12	0.005	295	5.76	0.005	175	4.17
Bi	0.001	1.62	0.14	0.001	1.98	0.02	0.001	0.796	0.02	0.001	1.61	0.02
Th	0.005	27	2.55	0.005	45	1.62	0.005	18	0.97	0.002	21.8	0.85
Ag	0.56	59.5	5.14	0.029	4.59	0.35	0.01	3.83	0.24	0.012	1.83	0.26
Y	0.5	1446	35.5	0.5	570	3.74	0.5	237	2.94	0.5	129	2.69
Zr	75	1255	299.7	18	7971	162.72	15	1867	156.2	17	1778	178.1
Fe	0.849	23.73	3.65	0.4	31.88	1.94	0.21	24.48	1.58	0.24	26.55	1.35
Ti	0.03	0.43	0.11	0.01	0.64	0.05	0.01	0.48	0.05	0.01	0.58	0.18
Mg	0.5	2.71	0.68	0.5	5.76	0.57	0.5	5.61	0.6	0.5	5.32	1.55
Al	2.45	9.03	5.48	1.84	9.6	4.16	1.5	8.5	4.04	1.76	9.21	4.38
Si	19.12	37.2	26.62	9.06	38.54	29.69	7.13	39.86	28.78	7.53	39.35	28.92
P	0.005	0.8	0.02	0.005	1.72	0.01	0.005	1.45	0.01	0.005	0.47	0.01
S	0.27	8.97	1.37	0.1	8.13	0.58	0.06	16.31	0.37	0.01	4.03	0.17
K	0.005	2.67	0.03	0.005	2.51	0.01	0.005	1.74	0.01	0.005	2.22	0.09
Ca	0.16	5.15	0.65	0.07	19	0.3	0.05	21.94	0.29	0.04	20.3	0.2

Примечание. В скобках – количество проб в выборках.

	Re	U	Mo	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Cd	Sb	Tl	Pb	Bi	Th	Ag	Ti	Zr	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Y	
Re	1																															
U	0.08	1																														
Mo	0.01	0.72	1																													
V	-0.11	0.16	0.06	1																												
Cr	-0.19	0.12	0.14	0.62	1																											
Mn	0.04	0.06	0.01	-0.01	0.08	1																										
Fe	0.09	0.17	0.08	0.36	0.28	0.08	1																									
Co	0.16	0.19	0.27	0.19	0.18	0.11	0.32	1																								
Ni	0.07	0.32	0.12	0.24	0.20	-0.02	0.31	0.82	1																							
Cu	0.07	0.06	0.02	0.16	0.11	-0.05	0.21	0.27	0.10	1																						
Zn	0.02	0.32	0.17	0.35	0.37	0.03	0.23	0.33	0.29	0.29	1																					
As	0.12	0.19	0.34	0.11	0.10	0.08	0.73	0.38	0.42	0.10	0.14	1																				
Se	0.26	-0.01	-0.01	-0.01	0.04	-0.04	0.00	0.02	0.07	0.05	0.01	-0.01	1																			
Sr	0.00	0.17	0.08	0.12	0.23	0.65	0.12	0.16	0.10	0.00	0.16	0.15	-0.06	1																		
Cd	0.06	0.12	0.14	0.09	0.05	0.00	0.05	0.05	0.06	0.01	0.76	0.04	0.03	0.05	1																	
Sb	-0.06	0.03	0.06	0.09	0.12	0.03	0.10	0.08	0.14	0.07	0.11	0.03	-0.03	0.05	0.02	1																
Tl	0.15	0.33	0.50	0.19	0.17	0.22	0.67	0.42	0.45	0.12	0.27	0.85	-0.02	0.33	0.07	0.07	1															
Pb	0.01	0.11	0.15	0.34	0.28	0.00	0.24	0.14	0.23	0.14	0.23	0.10	0.12	0.07	0.05	0.71	0.18	1														
Bi	-0.14	0.17	0.22	0.51	0.49	-0.03	0.28	0.12	0.22	0.19	0.30	0.06	-0.06	0.13	0.05	0.18	0.22	0.42	1													
Th	-0.08	0.08	0.03	0.46	0.45	0.05	0.32	0.15	0.16	0.05	0.27	0.11	-0.07	0.12	0.06	0.09	0.23	0.29	0.61	1												
Ag	-0.05	0.21	0.28	0.60	0.49	-0.15	0.22	0.14	0.25	0.26	0.38	0.07	0.00	0.03	0.13	0.19	0.17	0.36	0.59	0.46	1											
Ti	-0.24	0.19	0.13	0.75	0.67	-0.11	0.27	0.11	0.16	0.14	0.39	0.06	-0.11	0.13	0.10	0.09	0.17	0.30	0.73	0.55	0.65	1										
Zr	-0.03	0.11	0.08	0.36	0.30	-0.18	0.19	0.05	0.09	0.15	0.33	0.08	-0.07	-0.06	0.26	0.00	0.12	0.13	0.39	0.31	0.75	0.53	1									
Mg	0.04	0.06	0.01	-0.02	-0.07	0.76	-0.01	0.07	-0.04	-0.06	-0.02	0.07	-0.05	0.69	0.00	0.01	0.20	-0.02	-0.02	-0.03	-0.15	-0.11	-0.19	1								
Al	-0.16	0.18	0.13	0.62	0.58	-0.05	0.31	0.14	0.20	0.14	0.34	0.13	-0.11	0.20	0.08	0.08	0.25	0.26	0.64	0.39	0.56	0.74	0.44	-0.04	1							
Si	0.04	-0.14	-0.08	-0.30	-0.24	-0.61	-0.17	-0.12	-0.08	-0.03	-0.16	-0.13	0.10	-0.67	-0.04	-0.06	-0.30	-0.13	-0.33	-0.15	-0.17	-0.26	-0.11	-0.72	-0.61	1						
P	0.06	0.21	0.05	0.14	0.02	0.42	0.17	0.14	0.07	0.02	0.10	0.19	-0.05	0.59	0.09	0.04	0.33	0.07	0.16	0.13	0.03	0.09	0.00	0.51	0.12	-0.45	1					
S	0.19	0.31	0.14	0.14	0.08	0.18	0.62	0.30	0.43	0.13	0.22	0.59	-0.01	0.32	0.11	0.05	0.67	0.19	0.41	0.30	0.30	0.18	0.21	0.23	0.24	-0.32	0.39	1				
K	-0.26	0.03	-0.01	0.62	0.64	0.11	0.15	0.09	0.12	0.02	0.23	0.02	-0.11	0.31	0.00	0.05	0.10	0.14	0.29	0.33	0.25	0.73	0.19	0.16	0.57	-0.34	0.19	-0.02	1			
Ca	0.04	0.07	0.01	-0.04	-0.08	0.85	-0.02	0.04	-0.05	-0.07	-0.02	0.04	-0.05	0.74	0.00	0.02	0.18	-0.02	-0.03	-0.05	-0.18	-0.13	-0.19	0.95	-0.05	-0.74	0.53	0.24	0.09	1		
Y	0.03	0.60	0.22	0.44	0.35	0.13	0.28	0.21	0.19	0.11	0.36	0.19	-0.05	0.33	0.11	0.11	0.39	0.27	0.47	0.36	0.33	0.55	0.24	0.08	0.50	-0.34	0.38	0.35	0.35	0.10	1	

Рис. 4.4. Матрица парных корреляций для выборки геохимических проб по содержаниям Re  $\leq 0.1$  г/т (1408 проб)

	Re	U	Mo	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Cd	Sb	Tl	Pb	Bi	Th	Ag	Ti	Zr	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Y
Re	1																														
U	-0.05	1																													
Mo	-0.04	0.63	1																												
V	-0.04	0.32	0.20	1																											
Cr	-0.04	0.07	0.20	0.19	1																										
Mn	-0.03	0.07	-0.03	0.03	0.04	1																									
Fe	0.04	0.24	0.10	0.34	0.10	0.05	1																								
Co	-0.04	0.11	0.13	0.09	0.02	-0.03	0.39	1																							
Ni	-0.08	0.13	0.19	0.08	0.11	-0.07	0.37	0.95	1																						
Cu	-0.07	0.12	0.06	0.16	0.11	-0.02	0.25	0.06	0.04	1																					
Zn	0.04	0.14	0.12	0.44	0.08	-0.04	0.18	0.19	0.21	0.16	1																				
As	0.01	0.17	0.15	0.13	0.03	0.00	0.60	0.68	0.73	0.04	0.18	1																			
Se	-0.04	-0.02	-0.05	0.18	0.03	-0.07	0.03	-0.02	-0.02	0.15	-0.02	-0.03	1																		
Sr	0.03	0.27	0.10	0.06	0.00	0.64	0.14	0.08	0.04	-0.02	0.01	0.14	-0.11	1																	
Cd	0.12	0.13	0.15	0.40	0.10	0.00	0.16	0.12	0.13	0.14	0.78	0.12	0.02	0.01	1																
Sb	-0.07	0.06	0.02	0.05	0.01	0.21	0.08	0.02	0.02	0.21	0.00	0.02	-0.03	0.16	0.01	1															
Tl	-0.02	0.22	0.18	0.16	0.02	0.09	0.60	0.76	0.80	0.03	0.20	0.89	-0.06	0.20	0.10	0.07	1														
Pb	-0.02	0.09	0.01	0.19	0.05	0.11	0.14	0.05	0.02	0.22	0.01	0.06	0.35	0.08	0.03	0.69	0.08	1													
Bi	-0.08	0.66	0.36	0.51	0.12	0.06	0.33	0.12	0.07	0.20	0.15	0.12	0.00	0.16	0.08	0.13	0.20	0.25	1												
Th	0.08	0.44	0.19	0.33	0.08	0.01	0.44	0.09	0.05	0.09	0.13	0.09	-0.04	0.09	0.07	0.02	0.18	0.14	0.61	1											
Ag	-0.02	0.33	0.38	0.76	0.18	-0.12	0.17	0.04	0.07	0.31	0.42	0.03	0.26	-0.07	0.43	0.01	0.04	0.26	0.41	0.30	1										
Ti	-0.08	0.58	0.43	0.40	0.11	-0.13	0.20	0.08	0.08	0.09	0.15	0.06	0.04	0.08	0.12	0.02	0.13	0.08	0.75	0.51	0.52	1									
Zr	-0.07	0.30	0.36	0.27	0.05	-0.20	0.11	0.01	0.03	0.05	0.24	-0.01	0.01	-0.12	0.23	-0.01	-0.02	0.04	0.27	0.33	0.63	0.50	1								
Mg	0.00	0.09	0.00	-0.01	-0.03	0.73	0.10	0.00	-0.02	-0.09	-0.04	0.04	-0.09	0.71	-0.03	0.11	0.12	0.00	0.06	0.00	-0.17	-0.08	-0.19	1							
Al	-0.09	0.46	0.33	0.34	0.10	0.03	0.39	0.15	0.15	0.11	0.21	0.17	-0.06	0.24	0.15	0.13	0.27	0.10	0.58	0.35	0.38	0.49	0.34	0.07	1						
Si	0.05	-0.26	-0.12	-0.13	-0.02	-0.68	-0.19	-0.05	-0.03	0.04	-0.07	-0.09	0.12	-0.71	-0.04	-0.17	-0.19	-0.04	-0.24	-0.09	0.00	-0.06	0.01	-0.82	-0.56	1					
P	0.06	0.44	0.15	0.14	0.02	0.17	0.33	0.04	0.04	0.01	0.02	0.14	-0.04	0.40	0.06	0.13	0.22	0.05	0.24	0.38	0.07	0.25	-0.01	0.27	0.28	-0.30	1				
S	0.07	0.28	0.18	0.20	0.01	0.06	0.75	0.30	0.29	0.05	0.14	0.36	-0.05	0.22	0.13	0.06	0.51	0.05	0.32	0.37	0.09	0.28	0.09	0.26	0.39	-0.27	0.41	1			
K	0.00	0.36	0.17	0.24	0.07	0.39	0.29	0.07	0.03	0.09	0.06	0.07	-0.06	0.50	0.06	0.25	0.20	0.16	0.42	0.42	0.16	0.45	0.01	0.48	0.41	-0.49	0.56	0.37	1		
Ca	-0.01	0.09	-0.02	-0.02	-0.03	0.82	0.01	-0.03	-0.06	-0.12	-0.05	0.00	-0.09	0.75	-0.04	0.13	0.07	-0.01	0.02	-0.04	-0.19	-0.12	-0.20	0.94	0.05	-0.84	0.25	0.14	0.40	1	
Y	-0.02	0.83	0.36	0.35	0.07	0.07	0.27	0.10	0.08	0.10	0.09	0.13	0.06	0.30	0.04	0.12	0.23	0.15	0.67	0.50	0.23	0.56	0.17	0.09	0.44	-0.25	0.67	0.31	0.41	0.10	1

Рис. 4.5. Матрица парных корреляций для выборки геохимических проб по содержаниям  $0.1 \leq Re \leq 0.5$  г/т (635 проб)

	Re	U	Mo	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Cd	Sb	Tl	Pb	Bi	Th	Ag	Ti	Zr	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Y
Re	1																														
U	0.06	1																													
Mo	0.09	0.17	1																												
V	0.12	0.10	0.22	1																											
Cr	0.10	0.13	0.26	0.69	1																										
Mn	0.03	0.03	-0.05	0.03	0.05	1																									
Fe	0.21	0.19	0.07	0.45	0.28	0.16	1																								
Co	0.20	0.05	0.08	0.16	0.21	0.13	0.26	1																							
Ni	0.22	0.11	0.24	0.36	0.27	0.00	0.33	0.39	1																						
Cu	0.12	0.06	0.02	0.27	0.28	0.06	0.26	0.29	0.22	1																					
Zn	0.11	0.10	0.28	0.18	0.18	-0.01	0.17	0.09	0.29	0.11	1																				
As	0.21	0.23	0.37	0.50	0.46	0.09	0.58	0.23	0.65	0.21	0.30	1																			
Se	0.18	0.00	-0.03	0.33	0.26	0.00	0.15	0.10	0.16	0.44	0.04	0.08	1																		
Sr	0.11	0.16	0.07	0.12	0.19	0.20	0.32	0.58	0.10	0.30	0.09	0.31	0.03	1																	
Cd	0.05	0.03	0.35	0.16	0.12	0.00	0.06	0.05	0.16	-0.01	0.82	0.25	0.01	0.01	1																
Sb	0.10	0.04	0.15	0.14	0.14	0.05	0.24	0.06	0.07	0.19	0.03	0.17	0.02	0.22	-0.01	1															
Tl	0.33	0.19	0.36	0.51	0.44	0.20	0.65	0.18	0.51	0.21	0.35	0.79	0.10	0.31	0.22	0.35	1														
Pb	0.21	0.03	0.01	0.48	0.36	0.02	0.21	0.15	0.23	0.36	0.04	0.20	0.65	0.03	0.02	0.18	0.21	1													
Bi	0.11	0.15	0.31	0.69	0.65	0.09	0.36	0.22	0.33	0.39	0.18	0.31	0.33	0.30	0.04	0.25	0.37	0.54	1												
Th	0.09	0.15	0.17	0.29	0.35	0.02	0.40	0.19	0.14	0.18	0.06	0.30	0.24	0.15	0.03	0.20	0.38	0.29	0.69	1											
Ag	0.31	0.13	0.17	0.41	0.38	0.02	0.25	0.28	0.22	0.21	0.13	0.22	0.42	0.09	0.07	0.03	0.22	0.45	0.26	0.35	1										
Ti	0.04	0.27	0.46	0.42	0.59	-0.05	0.21	0.14	0.25	0.18	0.11	0.30	0.16	0.16	0.08	0.15	0.29	0.23	0.69	0.43	0.33	1									
Zr	0.06	0.06	0.06	0.10	0.22	-0.02	0.13	0.03	0.04	0.09	0.04	0.11	0.06	0.00	0.04	0.02	0.08	0.07	0.14	0.66	0.50	0.39	1								
Mg	0.00	0.09	0.05	0.10	0.04	0.57	0.25	0.06	0.01	0.02	-0.03	0.19	-0.03	0.37	-0.01	0.10	0.25	0.00	0.12	0.06	-0.02	0.04	-0.03	1							
Al	0.09	0.21	0.37	0.45	0.53	0.01	0.43	0.21	0.25	0.17	0.13	0.43	0.12	0.22	0.10	0.24	0.50	0.22	0.59	0.30	0.33	0.63	0.16	0.14	1						
Si	-0.03	-0.15	-0.19	-0.29	-0.30	-0.47	-0.37	-0.16	-0.13	-0.08	-0.05	-0.33	-0.04	-0.36	-0.05	-0.19	-0.42	-0.10	-0.35	-0.17	-0.16	-0.28	-0.06	-0.71	-0.71	1					
P	0.08	0.24	0.08	0.18	0.15	0.15	0.37	0.15	0.10	0.15	0.00	0.37	-0.01	0.57	-0.01	0.19	0.39	0.04	0.18	0.22	0.07	0.18	0.07	0.31	0.26	-0.35	1				
S	0.21	0.19	0.29	0.40	0.27	0.09	0.78	0.22	0.31	0.11	0.14	0.63	0.01	0.30	0.11	0.24	0.65	0.10	0.25	0.30	0.27	0.25	0.15	0.32	0.46	-0.41	0.39	1			
K	0.09	0.25	0.16	0.25	0.23	0.27	0.32	0.16	0.10	0.19	0.02	0.32	0.05	0.36	0.01	0.19	0.39	0.11	0.39	0.24	0.08	0.33	0.01	0.54	0.35	-0.43	0.43	0.29	1		
Ca	-0.04	0.06	-0.01	0.05	0.01	0.71	0.14	0.05	-0.01	-0.02	-0.02	0.11	-0.02	0.35	-0.01	0.06	0.17	-0.01	0.06	0.01	-0.06	-0.02	-0.03	0.89	0.05	-0.70	0.29	0.17	0.33	1	
Y	0.10	0.36	0.28	0.29	0.35	0.03	0.28	0.24	0.20	0.16	0.16	0.44	0.06	0.38	0.12	0.18	0.53	0.13	0.38	0.29	0.24	0.44	0.22	0.10	0.39	-0.28	0.60	0.28	0.23	0.10	1

Рис. 4.6. Матрица парных корреляций для выборки геохимических проб по содержаниям  $0.5 \leq Re \leq 5.0$  г/т (730 проб)

	Re	U	Mo	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sr	Cd	Sb	Tl	Pb	Bi	Th	Ag	Ti	Zr	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Y
Re	1																														
U	0.44	1																													
Mo	0.95	0.44	1																												
V	0.13	0.13	-0.04	1																											
Cr	0.10	0.22	-0.01	0.89	1																										
Mn	0.00	-0.04	0.03	-0.14	-0.03	1																									
Fe	0.15	0.30	0.07	0.31	0.37	0.35	1																								
Co	0.51	0.37	0.41	0.47	0.45	-0.12	0.23	1																							
Ni	0.18	0.30	0.13	0.31	0.29	-0.14	0.35	0.92	1																						
Cu	0.21	0.12	0.07	0.79	0.72	0.03	0.23	0.44	0.30	1																					
Zn	0.67	0.36	0.66	0.15	0.17	-0.05	0.04	0.45	0.25	0.22	1																				
As	0.20	0.55	-0.01	0.42	0.47	-0.10	0.56	0.62	0.62	0.23	0	1																			
Se	0.33	0.22	-0.08	0.90	0.80	-0.14	0.11	0.37	0.29	0.93	0.32	0.22	1																		
Sr	0.20	0.44	0.15	0.22	0.24	0.10	0.44	0.09	0.09	0.13	0.03	0.35	0.12	1																	
Cd	0.07	0.58	-0.01	0.11	0.13	-0.05	0.17	0.01	0.02	0.07	0.21	0.17	0.07	0.01	1																
Sb	0.16	0.20	-0.05	0.58	0.58	-0.01	0.23	0.23	0.22	0.54	0.06	0.27	0.57	0.34	-0.02	1															
Tl	0.14	0.41	-0.08	0.37	0.37	0.10	0.52	0.69	0.77	0.23	0.05	0.81	0.19	0.41	0.06	0.37	1														
Pb	0.15	0.12	-0.01	0.85	0.71	-0.12	0.11	0.36	0.24	0.85	0.16	0.22	0.97	0.09	0.06	0.56	0.17	1													
Bi	-0.04	0.01	-0.07	0.19	0.30	0.33	0.44	0.02	0.08	0.15	-0.02	0.06	0.11	0.25	-0.10	0.42	0.32	0.05	1												
Th	0.33	0.17	0.38	-0.08	0.07	0.41	0.34	-0.03	0.08	0.10	0.25	-0.18	-0.14	0.16	-0.10	-0.09	-0.13	-0.10	0.37	1											
Ag	0.67	0.24	-0.31	0.78	0.74	-0.34	0.11	0.48	0.34	0.76	0.39	0.42	0.77	0.20	0.10	0.50	0.27	0.77	0.07	-0.09	1										
Ti	-0.01	0.11	0.08	-0.02	0.20	-0.04	-0.11	-0.25	-0.04	0.03	0.06	-0.29	0.02	0.18	-0.10	-0.02	-0.26	-0.06	0.32	0.36	-0.14	1									
Zr	0.13	0.20	0.10	0.48	0.55	-0.30	-0.14	0.18	0.08	0.45	0.11	0.09	0.67	0.16	-0.05	0.34	-0.05	0.54	0.05	0.06	0.79	0.54	1								
Mg	0.27	0.49	0.16	0.52	0.51	0.20	0.72	0.31	0.37	0.37	0.10	0.64	0.34	0.52	0.42	0.51	0.56	0.34	0.31	0.21	0.41	-0.04	0.09	1							
Al	0.18	0.37	0.19	0.29	0.47	0.04	0.32	0.00	0.12	0.26	0.14	0.15	0.24	0.47	0.04	0.41	0.10	0.17	0.39	0.33	0.10	0.66	0.48	0.40	1						
Si	-0.25	-0.46	-0.22	-0.41	-0.51	-0.17	-0.51	-0.14	-0.20	-0.34	-0.12	-0.39	-0.30	-0.57	-0.15	-0.49	-0.31	-0.27	-0.32	-0.31	-0.33	-0.35	-0.36	-0.62	-0.91	1					
P	0.08	0.20	0.03	0.13	0.15	0.23	0.32	0.08	0.04	0.13	0.03	0.27	0.14	0.45	0.13	0.29	0.28	0.06	0.43	0.18	0.45	0.03	-0.07	0.30	0.24	-0.39	1				
S	0.26	0.44	0.14	0.53	0.47	-0.07	0.72	0.38	0.43	0.29	0.10	0.76	0.29	0.50	0.43	0.40	0.58	0.32	0.10	0.04	0.34	-0.15	0.10	0.87	0.36	-0.58	0.24	1			
K	-0.05	0.20	-0.05	-0.06	0.07	0.71	0.31	-0.17	-0.10	0.07	-0.06	-0.08	-0.09	0.12	-0.03	0.05	0.03	-0.08	0.39	0.42	-0.22	0.18	-0.19	0.34	0.20	-0.26	0.31	-0.01	1		
Ca	0.14	0.35	0.05	0.33	0.36	0.55	0.68	0.13	0.20	0.30	0.00	0.43	0.15	0.51	0.24	0.33	0.43	0.18	0.38	0.33	0.40	-0.06	-0.09	0.78	0.34	-0.60	0.67	0.62	0.61	1	
Y	0.21	0.22	0.19	0.46	0.47	-0.10	0.04	0.37	0.20	0.40	0.49	0.12	0.54	0.19	-0.06	0.40	0.18	0.38	0.24	0.11	0.67	0.27	0.19	0.27	0.45	-0.41	0.18	0.26	-0.01	0.15	1

Рис. 4.7. Матрица парных корреляций для выборки геохимических проб по содержаниям Re  $\geq 5.0$  г/т (103 пробы)

**Таблица 4.5.** Корреляционные связи основных компонентов руд в группах проб, дифференцированных по  $C_{Re}$ , в сравнении с совокупной выборкой

Компонент руд	Химические элементы, связь с которыми сильнее проявлена в соответствующей группе, по сравнению с совокупной выборкой			
	Богатые руды ( $\geq 5$ г/т Re)	Рядовые руды (5–0.5 г/т Re)	Бедные руды (0.5–0.1 г/т Re)	Слабо минерализованные породы ( $< 0.1$ г/т Re)
Re	Mo, U, Zn, Ag, Co, Se	<	<	<
U	Re, Mo, As, Cd, Mg, S	<	Mo, Y, Bi, Ti	Mo, Y
Mo	Re, U, Zn, Co	Ti, As, Al	(слабый рост: U, Ti, Zn, Ag, Bi)	U, Ti

Примечание: < – ослабление корреляционной связи.

Изучение распределения Re и сопутствующих элементов в различных фракциях руд близкого по геологической позиции U-Mo-Re Бельского месторождения (Кременецкий и др., 2011) показывает тенденцию накопления Re (г/т) в ряду: глинистый цемент (до 6.3 г/т) – сульфидный цемент (до 7.7 г/т) – ультратонкая фракция сульфидов (до 13.0 г/т) – ультратонкая фракция угля (до 30.0 г/т), обнаруживая значимую положительную корреляцию Re с Mo, U, Y,  $\Sigma PZ\bar{E}$ , Se и Fe и отрицательную – с другими элементами (Zn, Cu, Pb, Ni, Co, Sc). В отличие от этого на Брикетно-Желтухинском месторождении установлена значимая положительная корреляция Re с Zn, Co, Ni и Pb, таким образом, определяя его геохимическую специфику.

### 4.3. Зональность Re, Mo, U, (Se) роллового типа

В распределении Re, U, и Mo была выявлена зональность рудных элементов (рис.4.8–4.11), характерная для пластово-инфильтрационных месторождений *роллового типа*, образованных эпигенетическими процессами (Перельман, 1980; Максимова, Шмариович, 1993). Результаты погоризонтного детального картирования ореолов осаждения U, Mo и Re, с учетом опробования на Se керн нескольких скважин, показали, что наблюдается рудоконтролирующая зональность. От тыловой окислительной зоны к передовой, восстановительной, эта минералогическая зональность выражена следующим рядом:  $(Fe^{+3} + Se) \rightarrow (Fe^{+2} + Se) \rightarrow (Se + U) \rightarrow U \rightarrow (U + Mo) \rightarrow Mo \rightarrow (Mo + Re) \rightarrow Re$ . На Брикетно-Желтухинском месторождении картируются фрагменты этого ряда (см. рис.3.8–3.11, 4.8–4.11), где

широкий ореол рениевой минерализации охватывает ореолы молибдена и урана. К сожалению, данных по Se недостаточно (опробование на Se проведено фрагментарно). В ряде случаев рений в повышенных концентрациях представлен в интервалах, где U и Mo практически отсутствуют. Такая же закономерность характерна для урановых месторождений песчаникового типа Притяньшаньской мегапровинции (Лаверов и др., 2000; Максимова, Шмариович, 1993; Подземное ..., 1998, Кочкин, 2020). Как и на других инфильтрационных песчаниковых месторождениях, здесь ореол селеновой минерализации кое-где прослеживается в верхней части зоны комплексного оруденения, распространяясь в светло-серые пески с отсутствием или низкими содержаниями сульфидов и органического вещества, т.е. в относительно более окисленную обстановку.

Наиболее отчетливая разница ореолов Re, U, Mo представлена в скважине №3-1 (рис. 4.11), расположенной в тылу главного ролла. Следует отметить, что в данной скважине содержания Se достигают максимальных значений – до 0.8 масс. %. Следовательно, ореолы Re и Mo расположены в передовой главного ролла, тогда как U и (Se) – в его тылу.

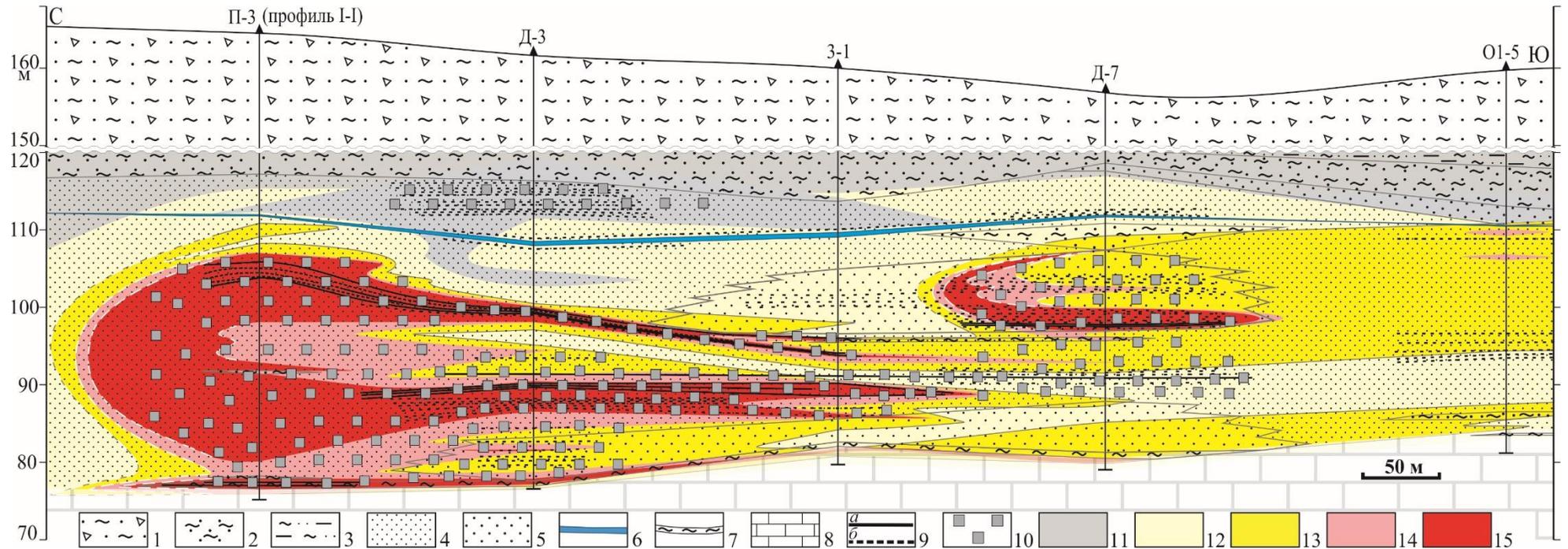
В соответствии с орогидрографическими реконструкциями периодов мезозоя (как и конца палеозоя, см. рис. 3.2) общее направление миграции поверхностных вод и, очевидно, подземных вод в бобриковско-тульском водоносном комплексе в южном крыле Московской синеклизы, было с юга на север. Вероятнее всего, что зона окисления так же продвигалась с юга на север через участок Брикетно-Желтухинского месторождения, а не с СЗ на ЮВ, как предполагали предыдущие исследователи (Карась и др., 2016, 2017).

Гидрогенная зональность роллового типа (рис. 4.8–4.11) была наложена на первичное распределение U, Mo, Re и Se в песчанистой толще, вероятно в триасе (240 млн лет назад) или на рубеже триаса и юры (200 млн лет назад; см. главу VI). 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:

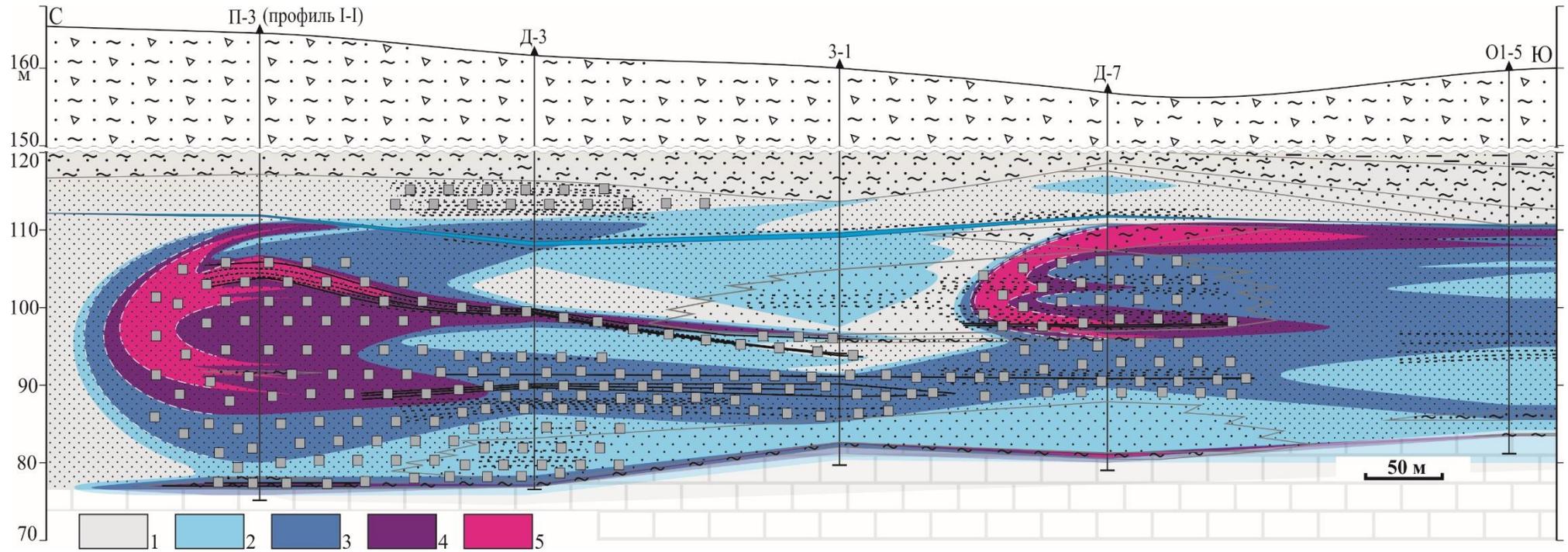
- 1) приуроченность рудных тел к крупной палеодолине;
- 2) фиксирующаяся в продольном разрезе северной части месторождения U-Mo-Re (Se) зональность роллового типа;
- 3) более широкое, по сравнению с ураном, распространение рения в разрезах, при частом совпадении их максимальных концентраций;
- 4) приуроченность зон окисления к наиболее проницаемым участкам пород (мелко-среднезернистые пески);
- 5) наличие среди рудоносной толщи тонких горизонтов окисления оранжевой окраски, 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 четвертичных долин (реки Верда и ее притоки), врезанных в рудовмещающие отложения. При этом можно полагать, что этот поздний пластово-инфильтрационный процесс мог начаться вследствие поступления вод из неогеновых отложений верховьев палео-Дона, залегающих – в результате размыва триасово-юрских отложений – на участке месторождения непосредственно на рудовмещающих отложениях нижнего карбона (см. рис. 1.3). Поэтому не исключено, что здесь Re-Mo-U скопления могли подвергнуться воздействию окислительных процессов, связанных с более свободным водообменом с поверхностными водами.

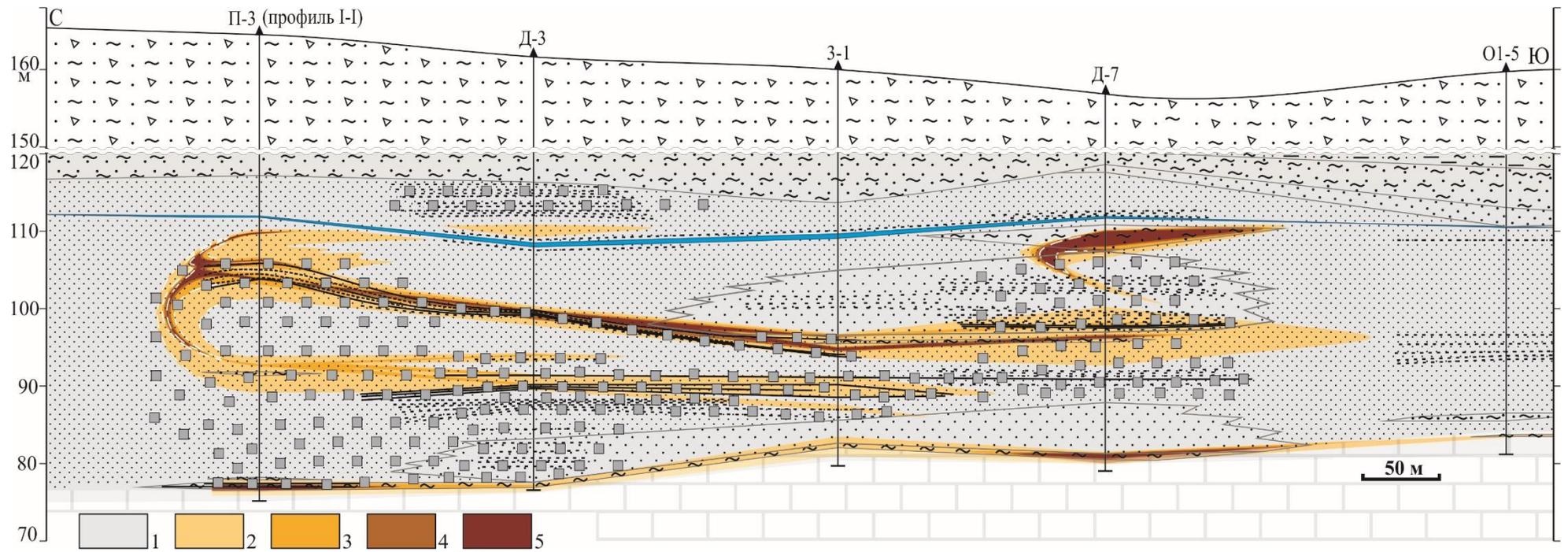


**Рис. 4.8.** Субмеридиональный разрез III–III (рис. 4.1.) рудоносной бобриковской толщи и распределение **Re** в породах.

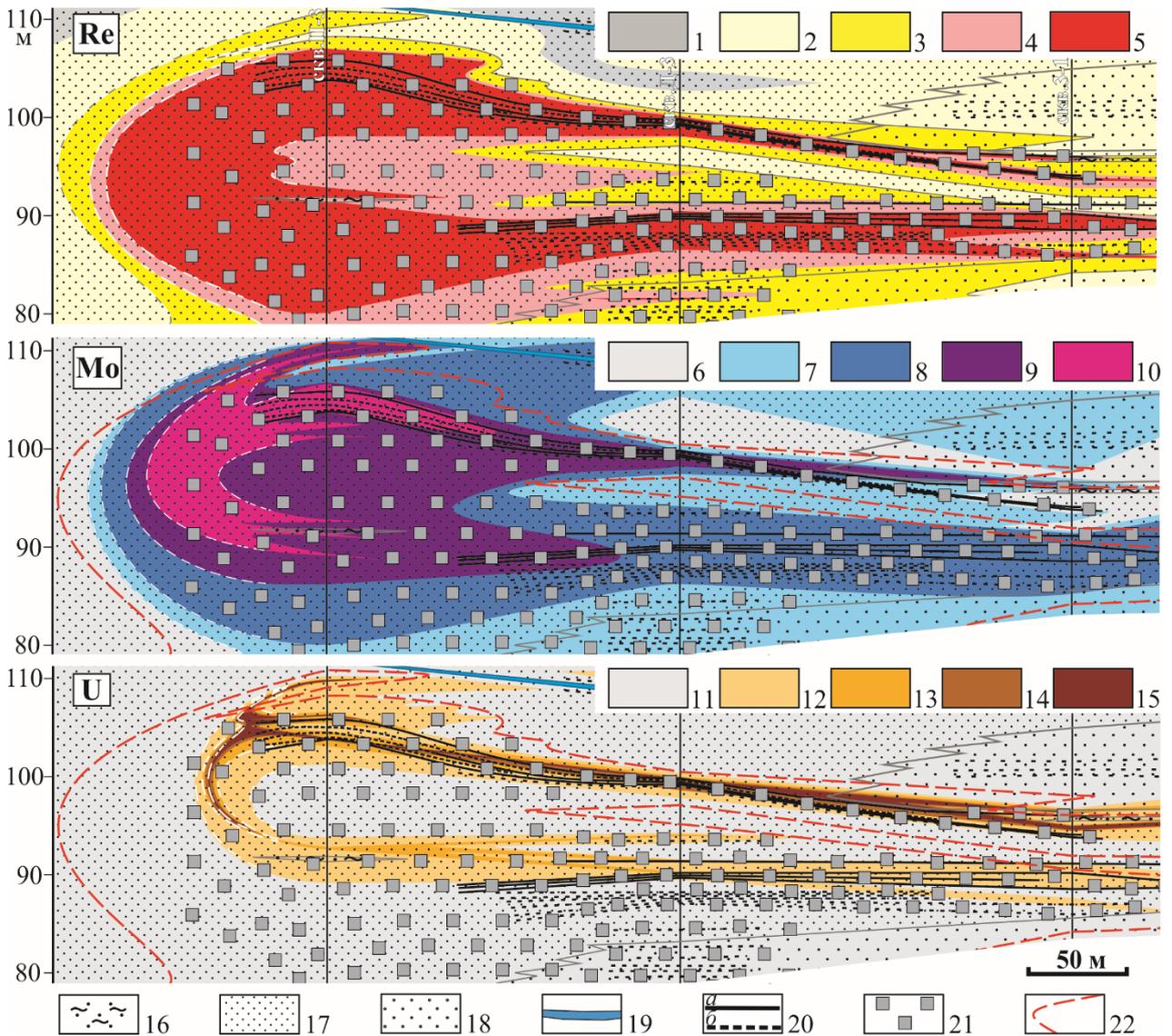
1 – неоген–четвертичные песчано-глинистые отложения; 2–7 – бобриковская свита (нижний–средний визе): 2 – глины плотные песчаные с прослоями песков, 3 – переслаивание песков, алевролитов, глин и их разностей, 4 – пески мелкозернистые, 5 – пески среднезернистые, 6 – прослой кремней, 7 – карбонатные глины в кровле толщи известняков; 8 – известняки (фамен); 9 – угли (а – прослой, б – обломки); 10 – сульфиды; 11–15 – содержание Re, г/т (11 –  $<0.01$ ; 12 –  $<0.1$ ; 13 –  $<0.5$ ; 14 –  $<1.0$ ; 15 –  $>1.0$ ).



**Рис. 4.9.** Разрез рудоносной бобриковской толщи по линии III–III (рис. 4.1) и распределение **Mo** в породах (легенда – см. рис. 4.8).  
1–5 содержание **Mo**, г/т (1 – <3; 2 – <10; 3 – <30; 4 – <100; 5 – >100).



**Рис. 4.10.** Разрез рудоносной бобриковской толщи по линии III–III (рис. 4.1) и распределение U в породах (легенда – см. рис. 4.8). 1–5 – содержания U, г/т (1 – <10; 2 – <30; 3 – <100; 4 – <200; 5 – >200).



**Рис. 4.11.** Рудное тело в форме классического ролла – северная часть продольного разреза III–III (рис. 4.1) с распределением концентраций Re, Mo, U (г/т) в породах.

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 – прослой кремней; 20 – угли: а – прослой, б – обломки; 21 – сульфиды; 22 – контур рудного тела по  $C_{Re} \geq 0.5$  г/т.

Приуроченность Брикетно-Желтухинского месторождения именно к зоне западного борта Окско-Донского прогиба и отсутствие сопоставимых по масштабам U-Mo-Re проявлений в остальных частях Подмосковского бурогоугольного бассейна говорят о том, что, вероятно, только на этом участке сложились условия для сохранения крупных рудных скоплений, возникших ранее в результате формирования зоны пластового окисления. Так, западнее (в Тульской области), где бобриковские и тульские отложения в настоящее время повсеместно вскрыты четвертичными врезами, и на большей части площади не имеют окско-мезозойского покрытия (либо оно сохранилось только в

районе небольших водораздельных пространств) подобные рудопроявления не установлены. Это относится и к южной части изучаемого района, где участки развития потенциально рудовмещающих пород (бобриковских и тульских отложений) представляют собой фактически эрозионные останцы.

Таким образом, проведенные геохимические исследования руд Брикетно-Желтухинского месторождения позволили установить корреляционные связи основных рудных элементов Re, Mo, U, Se, и выявить широкий ореол распространения рения, который охватывает ореолы молибдена и урана. Подтверждена тенденция накопления Re в сульфидной и – до ~600 г/т – углистой фракциях.

#### **4.4. Эксперименты по последовательному выщелачиванию основных компонентов руд месторождения**

В рудах схожего U-Mo-Re месторождения Бельское были установлены две формы нахождения урана: легкорастворимая (коллоидная), которая ассоциирует с глинистым и органическим веществом и труднорастворимая – настуран (урановая чернь), образующая вторичный цемент в песках и алевритах (Кременецкий и др., 2011). Уранинит был установлен в обогащённых Re углистых пробах. Отмечена тесная связь урановых выделений с пиритом (марказитом); обычны псевдоморфозы и каймы этой ассоциации на органических остатках. Ореол рения ( $C_{\text{борт}} > 0.5$  г/т) по вертикали достигает 48 м и охватывает практически всю продуктивную толщу, включая ореолы U и Mo. Средневзвешенное  $C_{\text{Re}} = 1.05$  г/т; вариации от 0.3 до 5.7 г/т; максимальные  $C_{\text{Re}}$  – до 30 г/т – в песках, насыщенных углистым детритом и дисульфидами железа.

Для определения форм нахождения U, Re и Mo в образцах руд Брикетно-Желтухинского месторождения нами были проведены эксперименты последовательного выщелачивания с использованием модифицированной схемы Тессьера (Tessier et al., 1979; Андрющенко и др., 2017). Извлечение катионов металлов осуществлялось различными растворами электролитов при разных параметрах проведения экспериментов, что позволяет полнее оценить формы нахождения этих металлов, прежде всего, сорбционные (Vikentyev et al., 2007; Новиков и др., 2014).

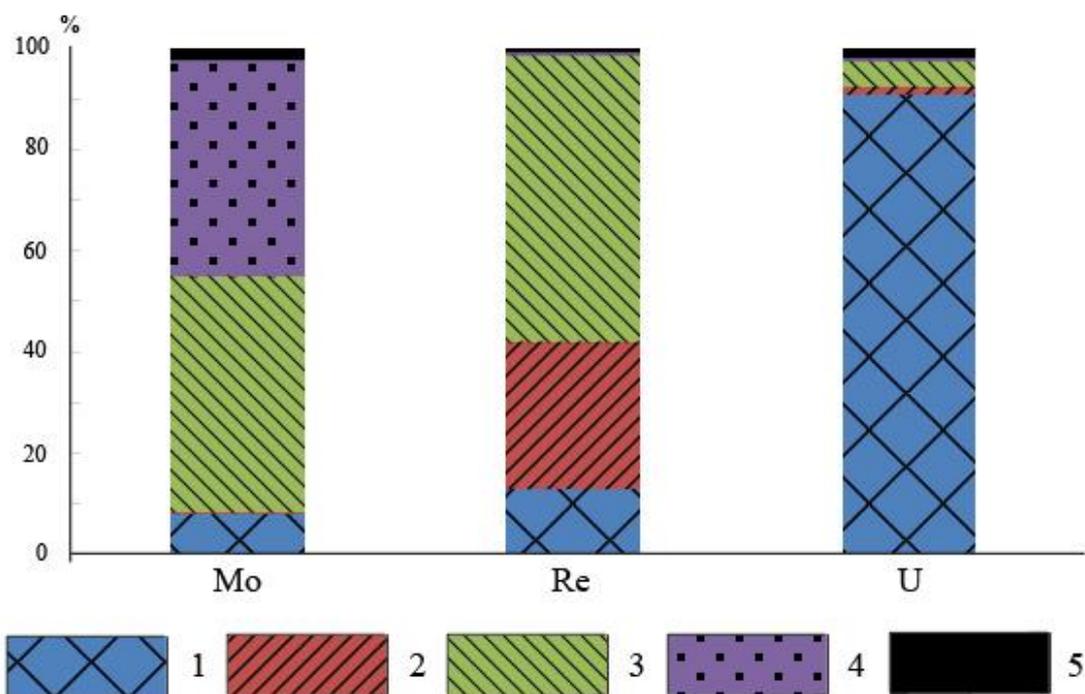
Было проведено последовательное выщелачивание (десорбция) металлов из образца наиболее богатого рением - углистого алеврита с повышенным содержанием U, Re и Mo (проба BZ-15, Табл. 5.2., Глава V). Исследуемая проба последовательно

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).

Проведенный эксперимент по десорбции металлов показал (рис. 4.12), что более половины рения (56%) в рудах связано с органическим веществом (углистой массой); 29% рения находится в ионообменной форме и 13% – в слабосвязанной. Менее 2% рения в рудах находится в прочносвязанной и в остаточной формах.

Молибден в основном представлен органической и прочносвязанной формами (47% и 43%, соответственно). На слабосвязанную форму приходится 8%, на остаточную – 2% молибдена. Ионообменная форма молибдена не была установлена.

Более 90% урана в пробе находится в слабосвязанной форме и легко вымывается дистиллированной водой. С органическим веществом связано только 5% урана. На ионообменную и прочносвязанную формы приходится по ~ 1%, в остаточной форме – ~ 2% урана.



**Рис. 4.12.** Распределение различных форм Mo, Re, U в образце углистого алеволита 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.

Результаты опытов показали, что значительная часть рения и молибдена, по видимому, находится в ионной форме и связана с органическим веществом по механизму комплексообразования.

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, вероятно, с Mo-сульфидами, что обосновано находками минеральных зёрен молибденит/иордизита с ~1 масс. % Re (Глава V); роль этих минеральных форм – подчиненная. Необходимо отметить, что ионообменный механизм весьма характерен и для глинистых минералов (Belousov et al., 2019), содержание которых в пробе превышает 20 масс. %. Однако, отделить глинистую фазу от органического вещества в данной пробе не представляется возможным.

Почти половина содержащегося в руде молибдена (47%) представлено в органическом веществе пробы. Немного меньше (43%) находится в прочносвязанной форме, что подтверждается наличием чешуек молибденита в составе богатых Re и Mo руд (Глава V, рис.5.7). 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 (Перельман, 1989). В высушенных рудных пробах (образцы углистого алеврита) отсутствуют окраски, весьма характерные для урановых слюдок (желтая, зелёная). Поэтому, можно предположить, что этот подвижный уран представлен не столько растворимыми уранильными минералами, сколько уранил-органическими соединениями со слабыми связями. Это будет точнее определено при

проведении дальнейших экспериментов избирательного выщелачивания. Связанные с органикой 5% урана представляют, скорее всего, более прочные органические соединения уранила. Незначительную часть ионообменной формы урана (~1%) можно объяснить тем, что большинство обменных позиций заняты более конкурентно-способными металлами с бóльшей ионной силой. Прочносвязанная форма урана (~1%) предположительно соответствует дисперсным минералам урана, нерастворимым в HCl. Неизвлекаемая форма (~2%), вероятнее всего, относится к урану в составе крайне устойчивых минералов (циркон, ксенотим, монацит). Можно предположить, что в данном эксперименте по десорбции происходит преобладающее высвобождение урана в легко подвижной уранильной форме из функциональных групп органического вещества.

Полученные результаты подтверждают сообщения ряда публикаций о преимущественной фиксации урана в уранил-органической форме в бурогольных (лигнитовых) месторождениях. Так, в лигнитах Южного Техаса установлено 70-90% уранилгуматов, остальной уран представлен плохо раскристаллизованными дисперсными минералами (Mohan et al. 1991). В богатых углеродом битуминозных отложениях уран в основном фиксируется в виде органических соединений (Meunier et al. 1990; Pownceby & Johnson, 2014).

Изложенные выше результаты исследований приводят к следующим выводам: 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.

Изложенные выше результаты обосновывают *второе защищаемое положение*: **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.**

## ГЛАВА V. МИНЕРАЛОГИЯ РУД U-Mo-Re БРИКЕТНО-ЖЕЛТУХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

### 5.1. Ранее выполненные работы (краткий обзор)

Минеральный состав U-Mo-Re руд исследовался группой ученых под руководством А.А. Кременецкого (ИМГРЭ) в образцах из сходного по геологическим характеристикам месторождения Бельское (Кременецкий и др., 2011), в котором урановая и сопутствующая минерализация в основном приурочены к зонам перехода пластов углей в песчано-глинистые отложения (Машковцев и др., 2017).

В рудах Бельского месторождения предварительно диагностированы следующие формы выделения Re: рениевые фазы  $\text{Re}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Ca}(\text{ReO}_4)_2$ ; примеси рения (0.1–0.5 масс. %) в других минеральных фазах – розазите  $(\text{Cu,Zn})_2[\text{CO}_3](\text{OH})_2$  и настуране; продукты сорбции рения на глинистом веществе (пирофиллит) и слюдах (мусковит) и, наконец, скопления наноагрегатов рения в ультратонкой сульфидно-углеродистой матрице (Кременецкий и др., 2011). Учитывая близкую геологическую позицию данного месторождения и рассматриваемого нами, можно ожидать, что дальнейшие исследования выявят на последнем похожие минеральные формы рения, помимо изоморфной его примеси в молибдените–иордизите. Не исключено нахождение других оксидов ( $\text{ReO}_2$ ), помимо упомянутого, а также сульфида рения  $\text{ReS}_2$ , как предполагалось и при изучении гидрогенных месторождений Притяньшанской урановой мегапровинции (Подземное ..., 1998). На примере этой провинции рассмотрены условия локализации и возможности попутной добычи рения способом подземного выщелачивания на гидрогенных месторождениях урана (Шмариович и др., 1987; Максимова, Шмариович, 1993; Подземное ..., 1998).

Детальное изучение минерального состава руд Брикетно-Желтухинского месторождения впервые проводилось методами электронной микроскопии при исследовании *урановой минерализации* (Расулова и др., 2007). Было выяснено, что уран присутствует, в основном, в сорбированной форме, и значительно реже встречаются оксид урана (единичные глобулы 0.05-0.4 мкм), коффинит (размерностью в доли микрона) и нингиоит (до 1 мкм). Уранинит был установлен в пробах углистых пород, обогащённых Re. Были отмечены приуроченность урановых фаз в целом к углистому детриту и пириту (марказиту), а также псевдоморфозы и

каймы ураново-пиритовой минерализации на органических остатках. Во всех образцах присутствовало U-содержащее электроноаморфное вещество с примесью Fe, S, Mo, Ni, Zn, V, Ti, Cu. В углистой массе пород были установлены минеральные фазы молибдена – молибденит и иордизит (выделения <1 мкм). Более подробные данные по рудной минералогии и диагностике минералов в сообщении не приводились. Позднее, в 2013–2015 гг., минералогия руд Брикетно-Желтухинского месторождения изучалась сотрудниками ИМГРЭ (с участием автора) по материалам оценочного бурения (Спиридонов и др., 2016; Кайлачаков, 2017). Однако минеральные формы селена и рения так и не были установлены, а существующих к настоящему времени данных, включая недавние публикации (Енгальчев и др., 2015; Енгальчев, 2019), для надежного определения всех минеральных форм Mo и U явно недостаточно.

## 5.2. Минералогия руд

Рыхлый характер рудных образцов и высокодисперсные, микронные, размеры собственных рудных фаз обусловили выбор электронной микроскопии главным методом их минералогического изучения.

В целом породы рудовмещающего бобриковского горизонта характеризуются неравномерной (местами очень высокой) насыщенностью углистым детритом, а также обилием дисульфидов железа, нередко образующих псевдоморфозы по углистым частицам (рис. 5.1). В углистых частичках постоянно присутствуют сульфиды в виде мелких, обычно микронных выделений; спорадически встречаются включения минералов U и Mo. В ходе настоящего исследования было выяснено, что оруденелые пески и алевритово-песчаные породы по составу преимущественно кварцевые олигомиктовые, высокозрелые. Среди обломочных зерен существенно преобладает *кварц* (>95 об. %), который представлен окатанными овальными зернами (0.5–2.5 мм), мутными, светло-серой окраски. В подчиненном количестве в породах присутствуют: 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.

### 5.2.1. Акцессорные минералы

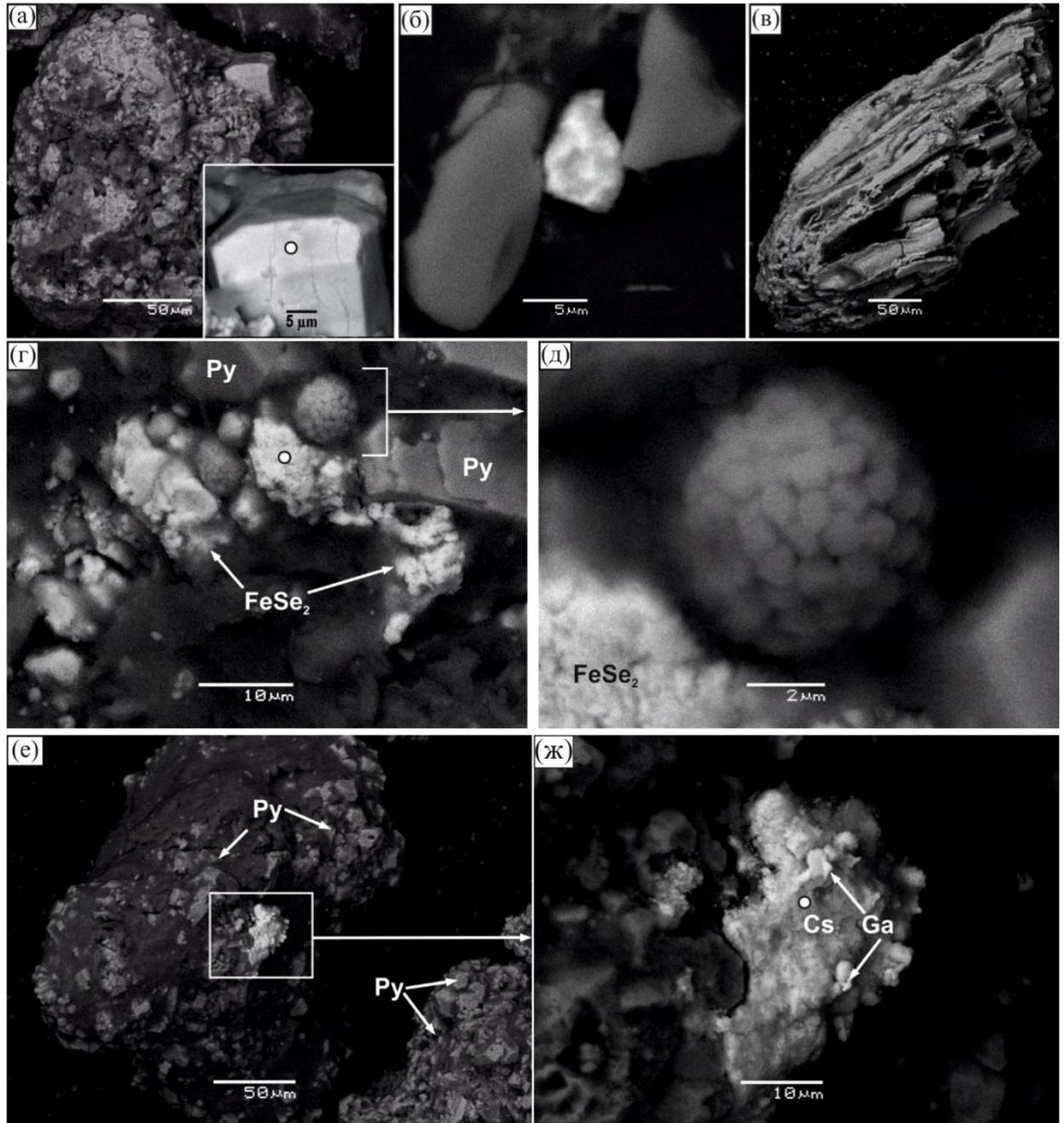
Среди *акцессорных минералов* тяжелой фракции песков и алевритов преобладают пирит (реже марказит), циркон (рис. 5.2а), титаномагнетит (рис. 5.2б), ильменит (рис. 5.2в). В подчиненном количестве присутствуют анатаз, лейкоксен, гематит, апатит, ставролит; в единичных микронных зернах – сфалерит, халькопирит (рис. 5.1б), пирротин, монацит, дистен, андалузит, касситерит (рис. 5.1е, ж) 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. %.

Помимо разнообразных форм *пирита* (Кайлачаков, 2017), 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. 5.4а). Морфология выделений Se-пирита позволяет судить об относительно более раннем его формировании, чем окружающего бесселенистого пирита.

В единичных выделениях были встречены *галенит*, *халькопирит*, *сфалерит* (с примесью Cd), *клаусталит*  $\text{PbSe}$  (рис. 5.4б, табл. 5.3). Морфология обнаруженного в образцах селенида железа  $\text{FeSe}_2$  – массивные, близкие к кубическим зерна – позволила диагностировать его как *джаркениит* (рис. 5.1г, д; 5.4б). В составе жаркениита установлены примеси Co (2 масс. %) и Ni (1.6 масс. %). Расчет состава привел к формуле  $(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.06}\text{Ni}_{0.05})_{0.96}\text{Se}_{2.04}$ .

Зерна *циркона* (0.5-2 мм) хорошо окатанные, овальные, прозрачные, реже полупрозрачные с желтоватым оттенком; по периферии зерен наблюдается обрастание циркона *ксенотимом* (рис. 5.2а). В составе ксенотима установлены примеси эрбия (до 4 масс. %), урана (до 3 масс. %) и скандия (до 3 масс. %). Спорадически встречается фосфат церия *монацит* (рис. 5.2в), в составе которого до 6 масс. % тория.

Преыдущими исследователями в составе руд данного месторождения были установлены селен самородный, вульфенит, сульфид серебра (акантит?), халькозин  $\text{Cu}_2\text{S}$ , антимонит  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  (Карась и др., 2017; Енгальчев и др., 2019).



**Рис 5.1.** Микрофотографии сульфидов: а – кристалл пирита, содержащего примесь селена (увеличен на врезке) на пиритовой конкреции с примазками алюмосиликатов; б – зерно халькопирита (светлое) между обломками алюмосиликатов; в – трубчато–волокнистая псевдоморфоза пирита по ископаемой древесине; г – джаркениит (яркое) в ассоциации с пиритом (Py, серое); д – фрамбоид пирита из октаэдрических кристалликов (0,8–1 мкм); е – конкреция пирита с касситеритом (светлое) на поверхности и примазками алюмосиликатов; ж – касситерит (Cs) с точечными включениями галенита (Ga, яркие). Здесь и далее – фото в обратно-рассеянных электронах (BSE). ° – точки анализа; составы минералов – в табл. 5.3.

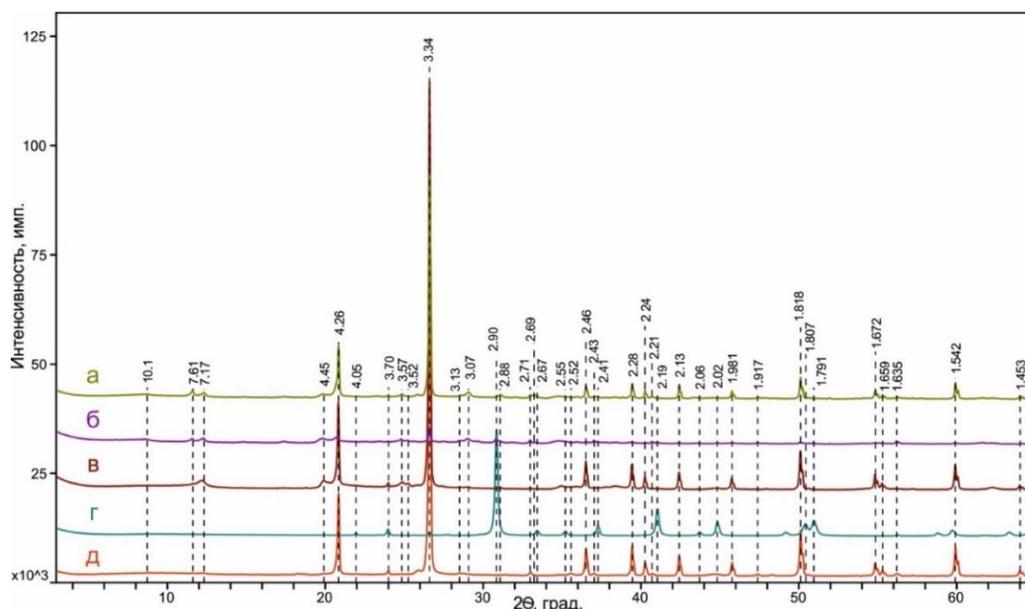


**Рис. 5.2.** Микрофотографии аксессуарных обломочных минералов: а – окатанное зерно: зональный циркон (Zrc), с включениями пирита (Py), в центре, и обрастание ксенотима по периферии (анализ т.2 в табл. 5.4); б – окатанное зерно титаномагнетита с пиритом вокруг (светлое) и нитевидным пиритовым прожилком; в – окатанное зерно ильменита с включениями пирита и монацита (Mnz, на врезке), с каймой неравномерного обрастания пиритом.

## 5.2.2. Глинистые минералы руд и результаты рентгенодифракционного анализа

Исследование методами количественного рентгенофазового анализа подтвердило, что в минеральном составе руд, как правило, преобладают кварц и/или глинистые минералы (рис.5.3, табл.5.1). Наряду с ними, в заметном количестве присутствуют полевые шпаты (альбит и микроклин), сульфаты (гипс, близкий по составу водный Са-сульфат бассанит, а также К-Fe-сульфат ярозит) и сульфиды (пирит, марказит). Спорадически встречаются гиббсит, доломит, хлорит, анатаз. Следует отметить, что марказит в заметном количестве (0.5 масс. %) 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 (обр. BZ-20), почти на 98 масс. % состоит из доломита и содержит такое же количество пирита, как в богатых рудах (см. табл. 5.1).

Глинистые минералы представлены каолинитом и смешанослойными иллит-сметитами с преобладанием иллитовых слоев, хлорит присутствует в незначительных количествах (табл. 5.1). В относительно бедном по содержанию U и Mo образце (BZ-13) среди глинистых минералов существенно преобладает каолинит, тогда как в глинистой фракции богатых U и Mo руд (BZ-14 и BZ-15) доминируют смешанослойные иллит-сметиты, а каолинит и хлорит присутствуют в качестве незначительной примеси.



**Рис. 5.3.** Рентгенодифракционные картины неориентированных (порошковых) препаратов руд Брикетно-Желтухинского месторождения; буквы обозначают номера образцов: а) BZ-15, б) BZ-14, в) BZ-13, г) BZ-20, д) BZ-4.

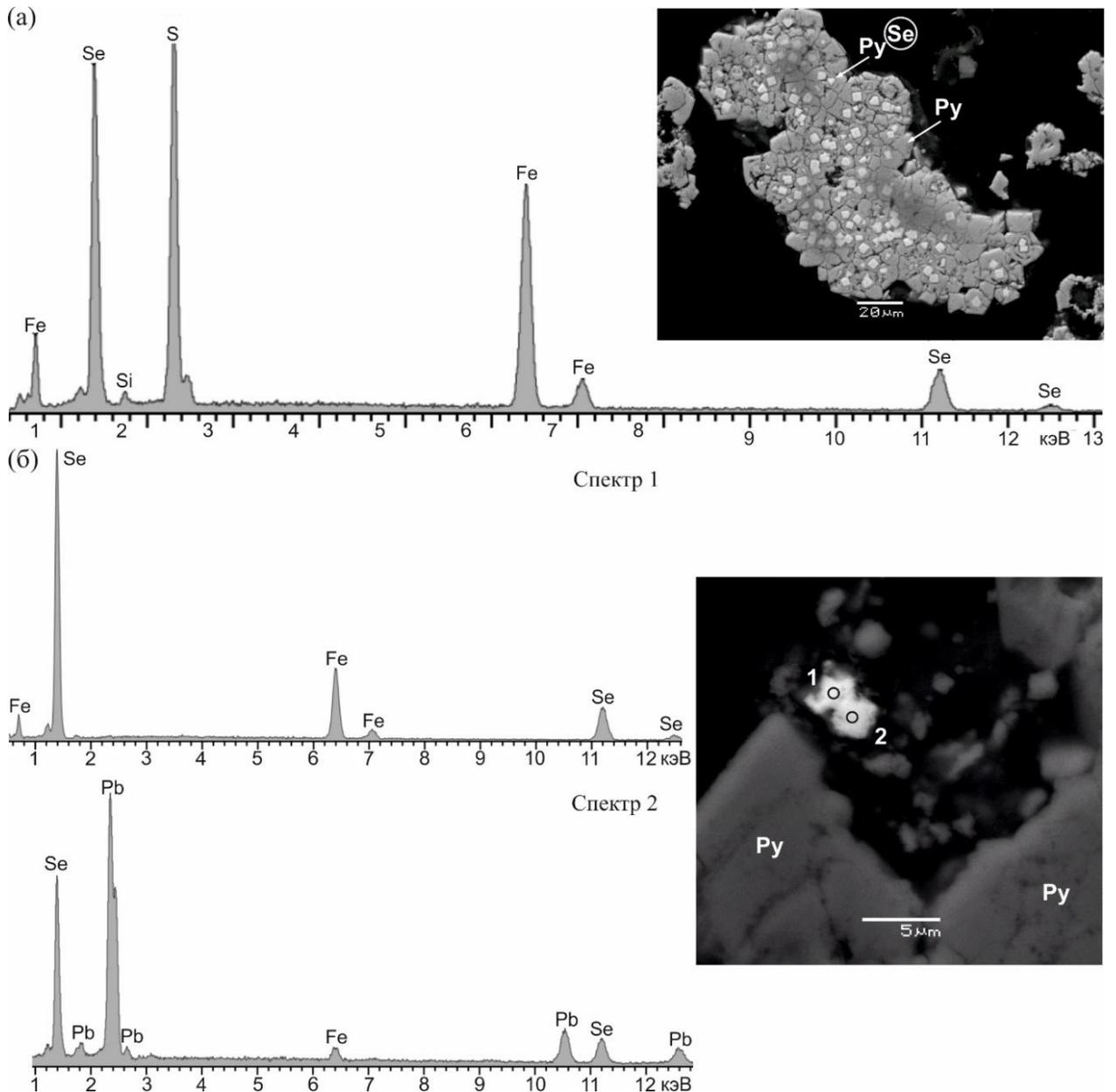
**Таблица 5.1.** Содержание минералов в образцах руд по результатам количественного рентгенофазового минералогического анализа (масс. %)

Минералы	Образцы руд				
	BZ-13	BZ-14	BZ-15	BZ-4	BZ-20
Кварц	54.9	3.7	42.9	80.3	1.2
Плагиоклаз (альбит)	-	2.0	1.8	2.3	-
Микроклин	2.9	5.3	3.1	-	-
Пирит	0.3	1.5	1	1.3	0.4
Марказит	-	-	0.5	-	-
Гиббсит	-	-	-	1.7	-
Ярозит	-	2.8	-		-
Гипс	0.9	3.6	6.8	0.9	-
Бассанит	-	1.5	-	-	-
Доломит	-	3.2	-		97.8
Каолинит	32.0	7.3	9.6	2.3	-
Иллит ± смешанослойный иллит-сметит	-	40.2	12.6	-	-
Хлорит		1.0	-	2.0	-
Анатаз	1.1	1.4	-	-	-
Диопсид	-	-	-	-	0.6
п.п.п.	7.8	26.7	21.7	11.2	н.о.

Примечание. Поскольку органическое вещество не определялось, содержание минералов было пересчитано с учетом данных п.п.п. (см. Глава IV. табл. 4.1); н.о. – не определялось (доломит). Аналитик С.В. Закусин (ИГЕМ РАН).

### 5.2.3. Минеральные фазы U, Mo, Se, Re в рудах месторождения

Главной задачей электронной микроскопии были поиски минеральных фаз Mo, U, Re и Se. Во всех предыдущих исследованиях минеральная форма Re не была установлена; минералы молибдена (молибденит, иордизит) были диагностированы “предварительно” (Карась и др., 2017); диагностика минеральных форм урана оставляла вопросы (Расулова и др., 2007). В результате проведенных нами исследований формы нахождения этих элементов в рудах Брикетно-Желтухинского месторождения были существенно уточнены (табл. 5.2–5.4), в частности установлены формы нахождения селена. Минеральные фазы *селена* в рудах представлены Se-пиритом, джаркенитом FeSe<sub>2</sub> и клаусталитом PbSe (Кайлачаков, 2021) (рис.5.4).



**Рис 5.4.** Микрофотографии и ЭДС-спектры селенистых фаз в рудах: а – кристаллы Se-пирита (светлое) в крупном пиритовом агрегате (серое); б – яркие зерна джаркенита  $\text{FeSe}_2$  (спектр 1) и клаусталита  $\text{PbSe}$  (спектр 2) в краевой, измененной части кристалла пирита.

Учитывая, что ранее минеральные фазы урана – уранинит, коффинит, нингиоит – были установлены методами электронной микроскопии (Расулова и др., 2007), наши исследования были направлены главным образом на поиски минеральной формы Re. Изучались преимущественно образцы руд со значительным содержанием рения.

**Уран.** Нами уран в рудных образцах месторождения был обнаружен в виде редких микронных и субмикронных включений уранинита (*настурана*) в пиритовой массе (рис. 5.5а). Кроме того, уран часто присутствует в составе углистых частиц (предположительно сорбированный). В ЭДС спектрах таких частиц пики урана лишь немного превышают фон, а пик углерода в таких спектрах существенно превышает

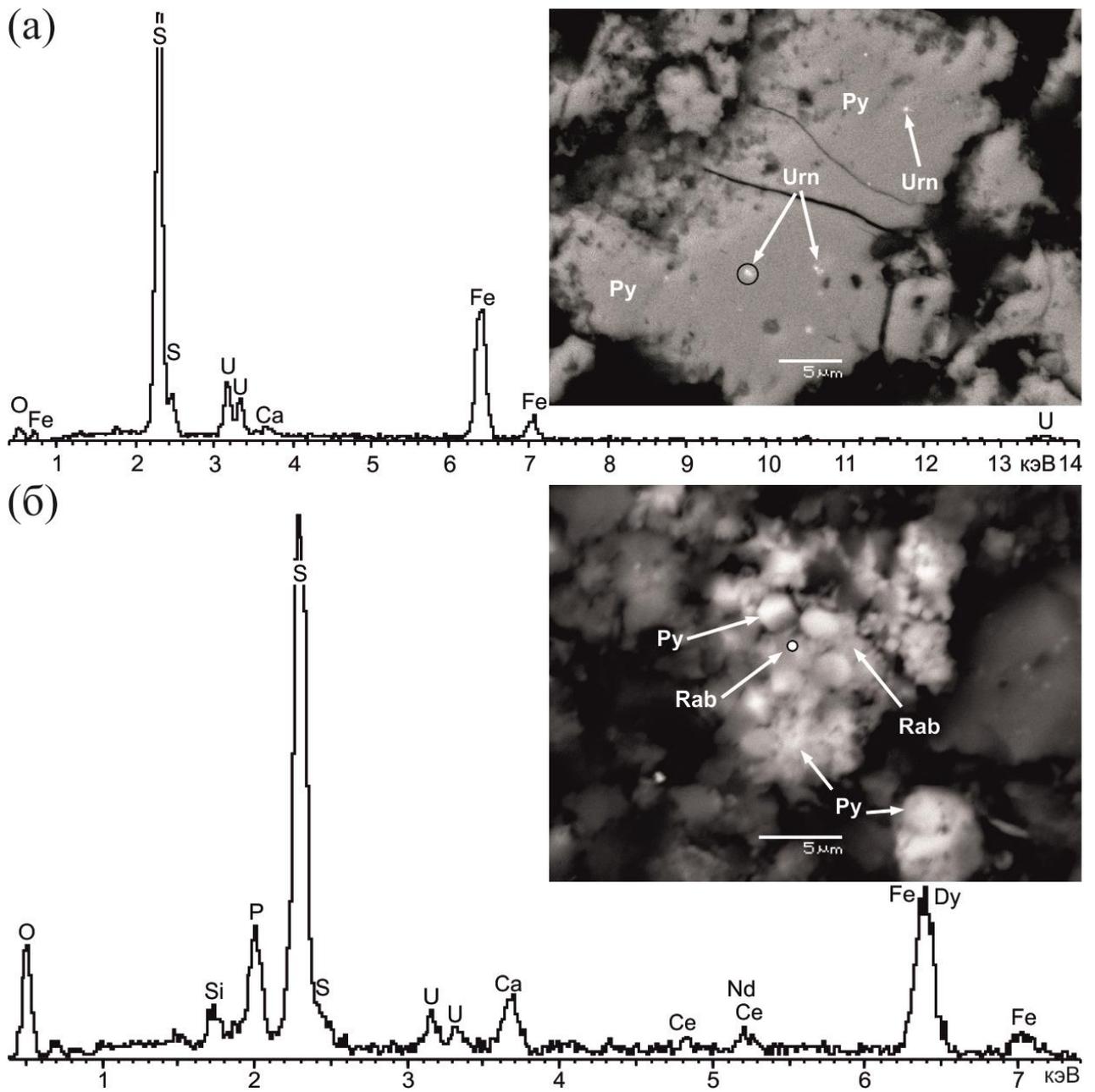
все остальные, как видно на спектре (рис. 5.6). Сорбированный уран (до 1 масс. %) установлен в колломорфных корках, развитых по измененному пириту, в них же содержится до 0.5 масс. % рения (рис. 5.8). Мы предполагаем, что уран присутствует также на кварцевых зёрнах песков, обеспечивая повсеместно их серую окраску. Ещё в 80-е гг. Л.Н. Беловой (ИГЕМ) было установлено, что во многих участках осадочных месторождений с содержанием до 0.1% урана, где даже применение методов ЭМ не позволяет установить индивидуальные минералы урана, повышенная активность связана с появлением темноокрашенных кварцев (Дойникова, Белова и др., 2003; Дойникова, 2012). Осколковая f-радиография показала, что урановые треки приурочены к таким темным кварцевым зернам и мелким галечкам, размером ~ 2-3 мм, образуя вокруг них тончайшие оторочки.

Уран (до 3 масс. %) в виде примеси присутствует в составе циркона (т. 1, рис.5.2). Он фиксируется также в составе оксидной Al-Fe-фосфатно-сульфатной массы (с переменным содержанием Si), которая часто покрывает зерна рядом лежащих частиц (предположительно Al-Si состава) (рис. 5.7). Эти фазы, сорбирующие уран, вероятно, представляют собой отмеченное ранее (Расулова и др., 2007) U-содержащее электроноаморфное вещество. Уран (~5.8 масс. %) был установлен также в составе редкоземельного фосфатного минерала типа рабдофана (Ca,U,REE)(PO<sub>4</sub>), где REE = Ce, Nd, Dy, в тесной ассоциации с фрамбоидальным пиритом (рис. 5.5б; табл. 5.4).

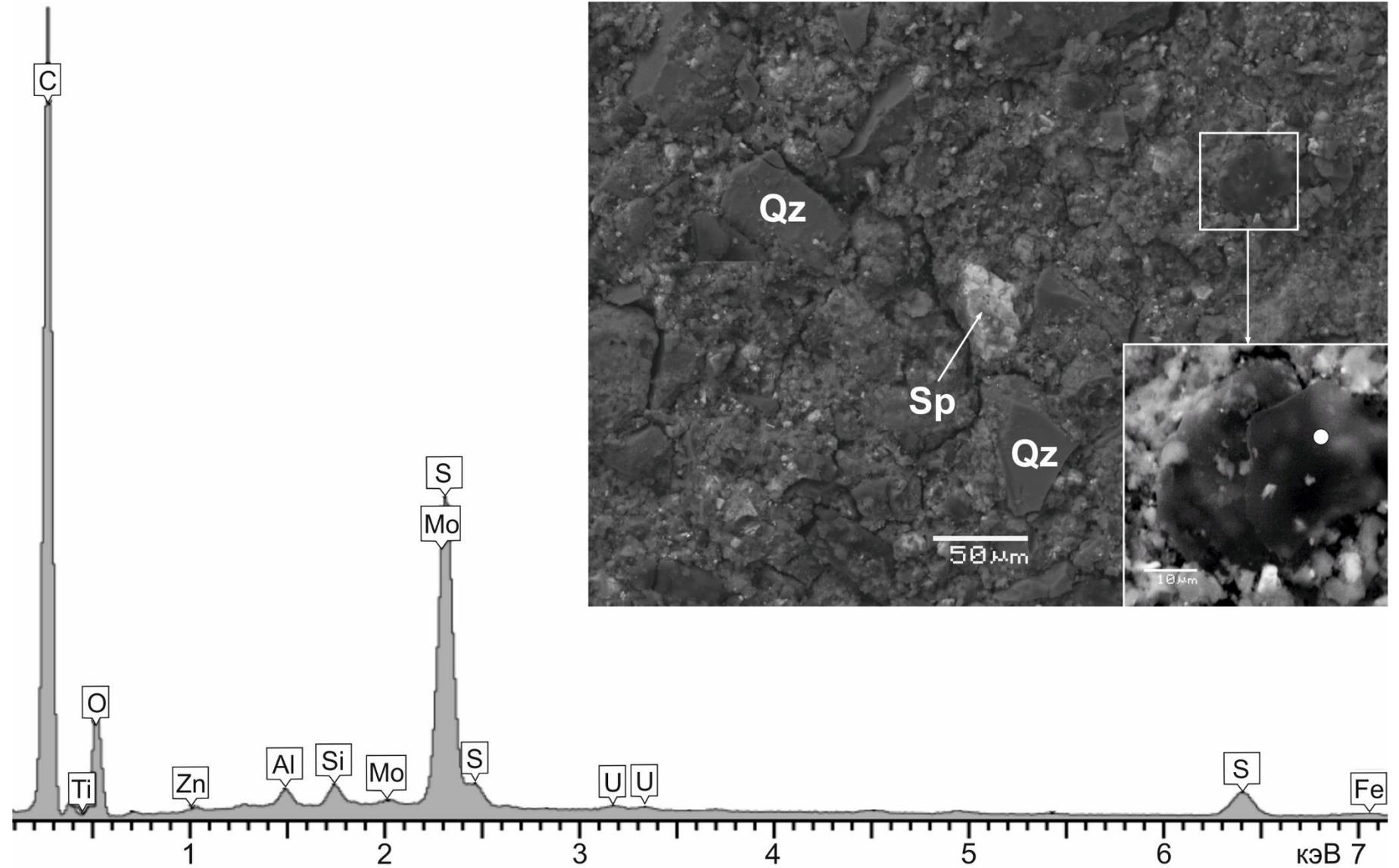
**Молибден** в рудах обычно представлен колломорфной Мо-сульфидной массой, с незначительно варьирующим содержанием железа, которая была нами диагностирована как иордизит – аморфный сульфид Мо с примесью Fe (~ 5–9 масс. %) (табл. 5.3). Часто это микронные зерна с неровными краями и трещинами, напоминающими раковистый излом (рис. 5.9, 5.10); редко – крупные (10-15 мкм) зерна угловатой морфологии (рис. 5.12). В составе подобной массы часто присутствуют (до 1.5 масс. %) элементы Re, Se, As, Zn, Co, Ni (рис. 5.10, 5.12).

Молибден в кристаллической форме (молибденит) был установлен в образце руды с высоким содержанием рения (рис. 5.11); в составе молибденита постоянно присутствует Fe (до 4 масс. %).

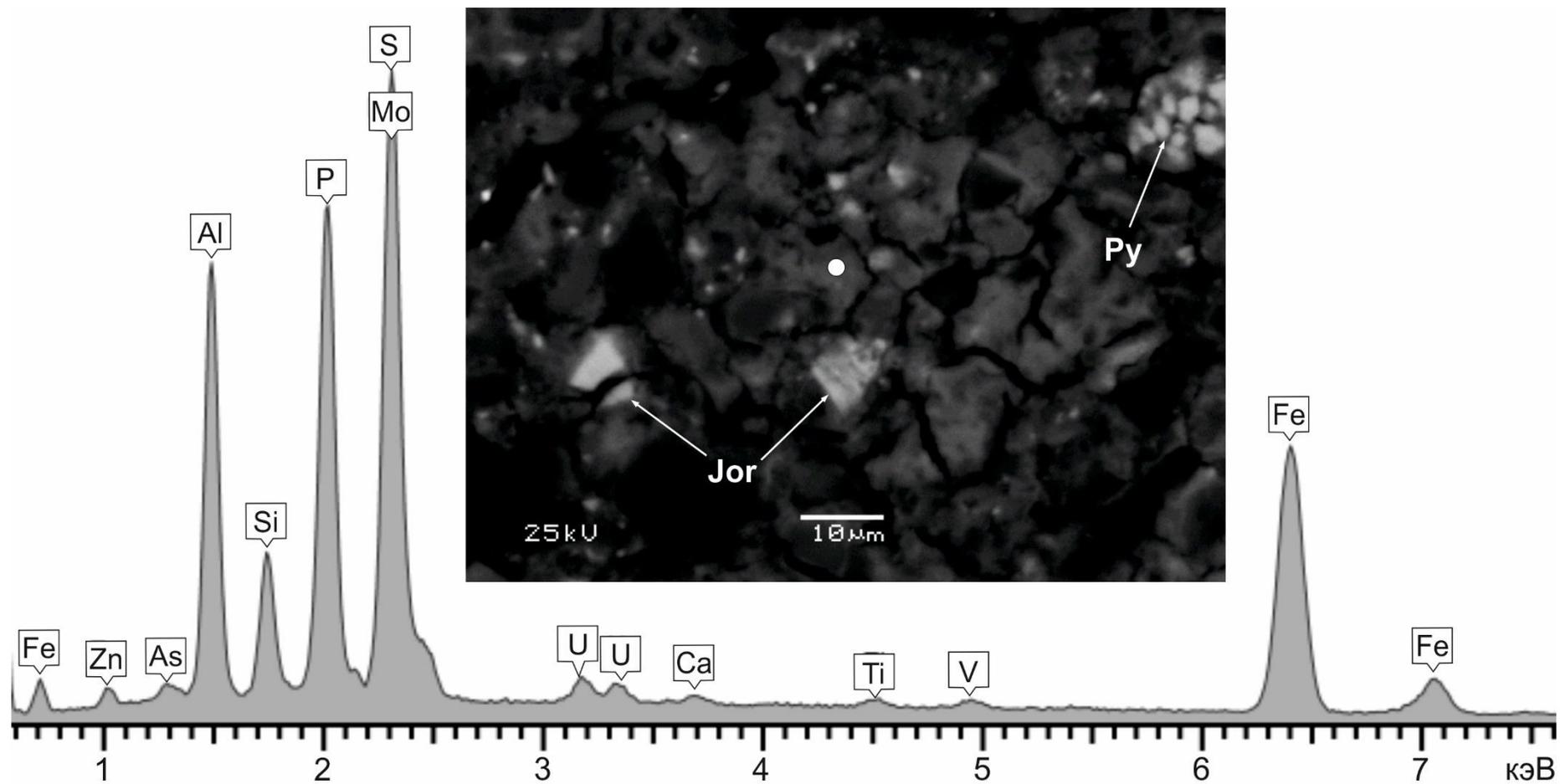
**Рений** был зафиксирован нами в составе минеральных фаз молибдена, как и предполагали предыдущие исследователи. В поисках собственных фаз Re и Mo особое внимание было уделено образцу с максимальным содержанием Re (583 г/т), который представлен веществом углистого пропластка. Re (до 1.5 масс. %) установлен в составе микронных частиц Мо(Fe)-сульфидного состава (иордизитовая масса) и в частицах молибденита – до 1.28 масс. % Re (см. рис. 5.11). Минеральной формой рения, предположительно, является изоморфное вхождение Re в кристаллическую решетку молибденита (Plotinskaya et al., 2018).



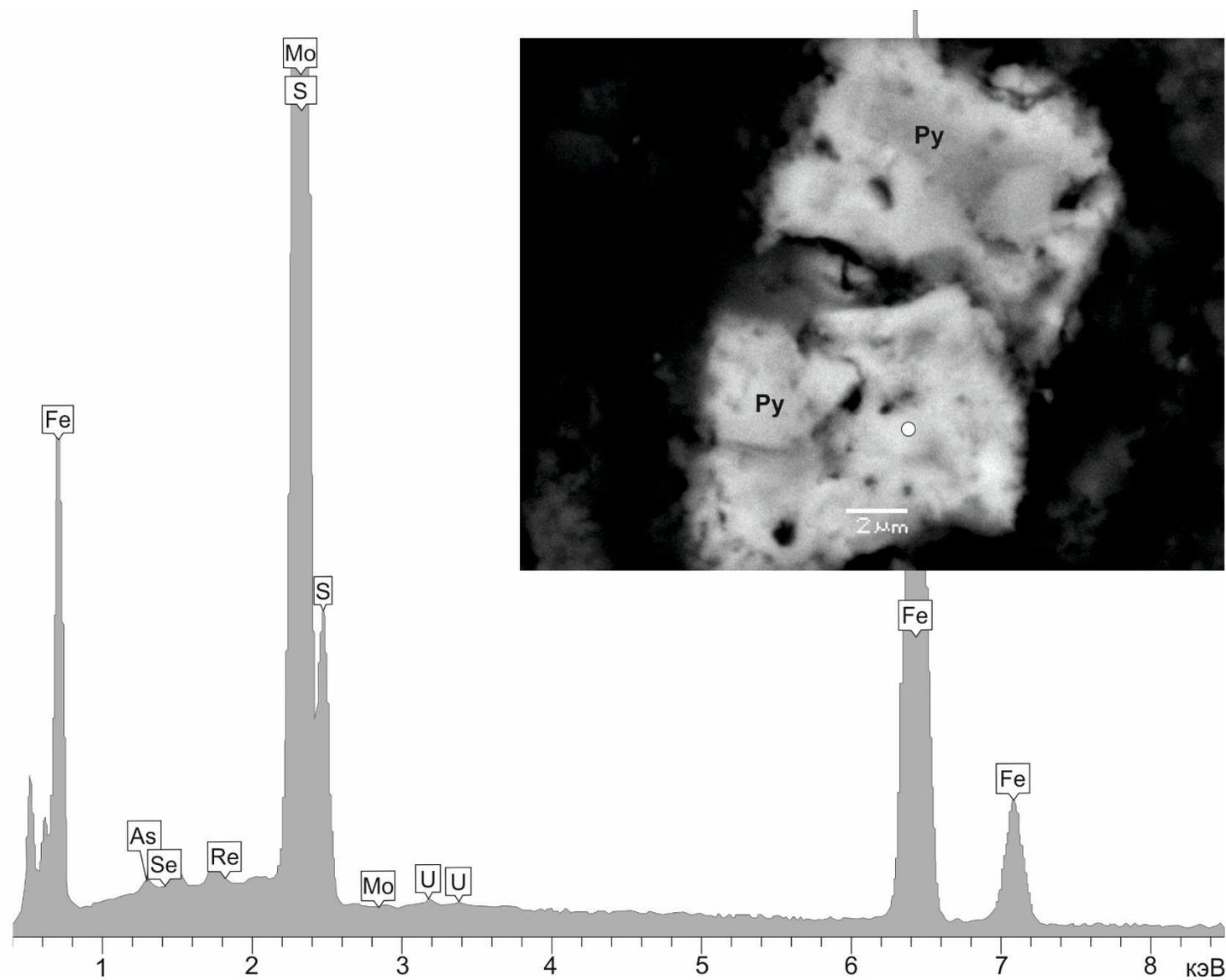
**Рис 5.5.** Микрофотографии и ЭДС-спектры минералов урана в рудах: а – субмикронные включения уранинита (яркие точки, Urn) в пиритовой массе; б – U-содержащий РЗЭ-фосфат типа рабдофана (Rab), в ассоциации с фрамбоидальным пиритом, среди его микронных кубиков. (Результаты анализа в отмеченных точках приведены в табл. 5.4).



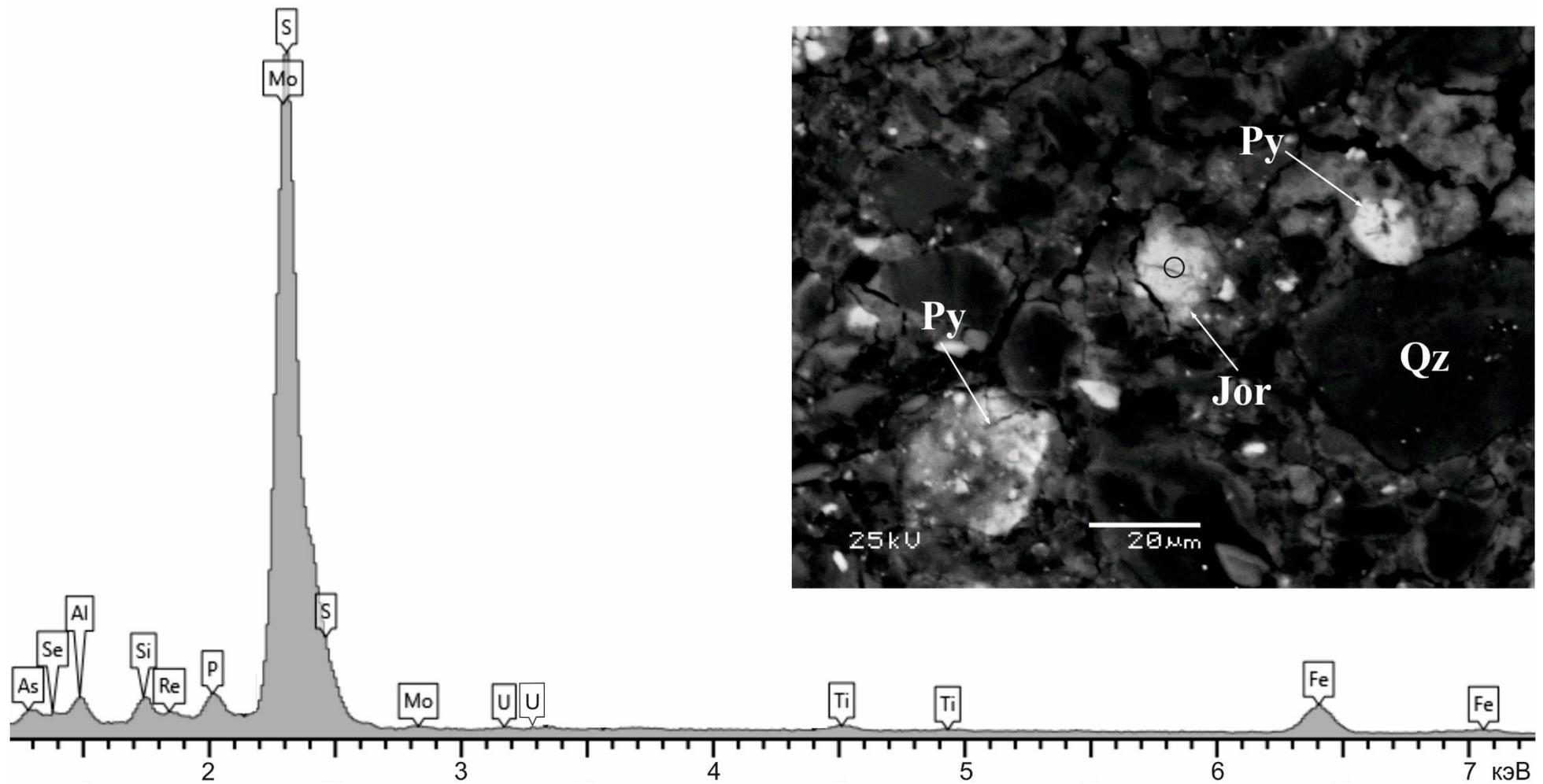
**Рис 5.6.** Микрофотография углистой частицы (на врезке) с сорбированными Mo и U (рассеянная форма) и соответствующий спектр состава в отмеченной точке анализа.



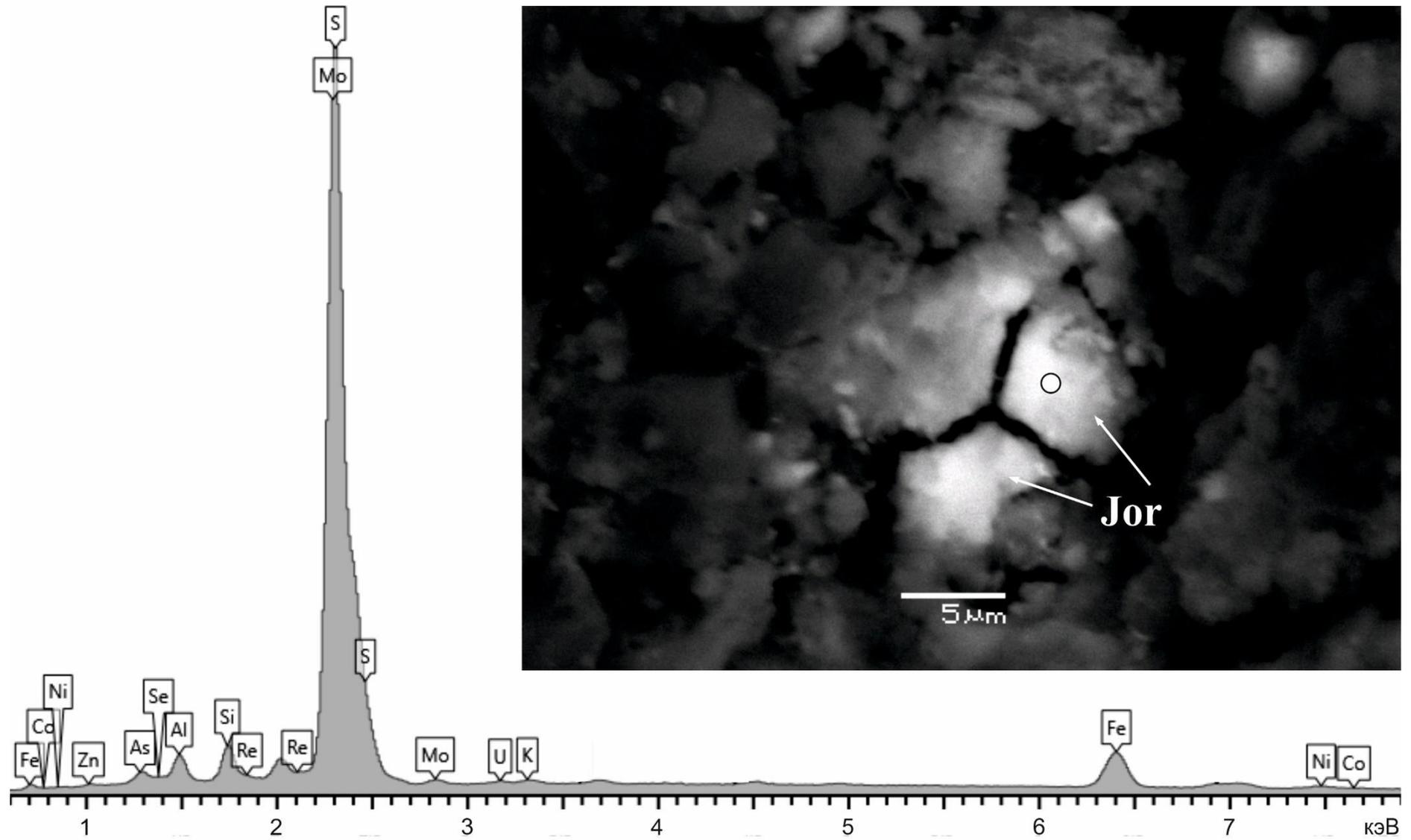
**Рис 5.7.** Микрофотография частицы иордизита (светло-серые, Jor) и Al-Fe-фосфо-сульфатная масса (серая корка на зернах) с сорбированными Mo и U (рассеянная форма) и соответствующий спектр состава в отмеченной точке анализа.



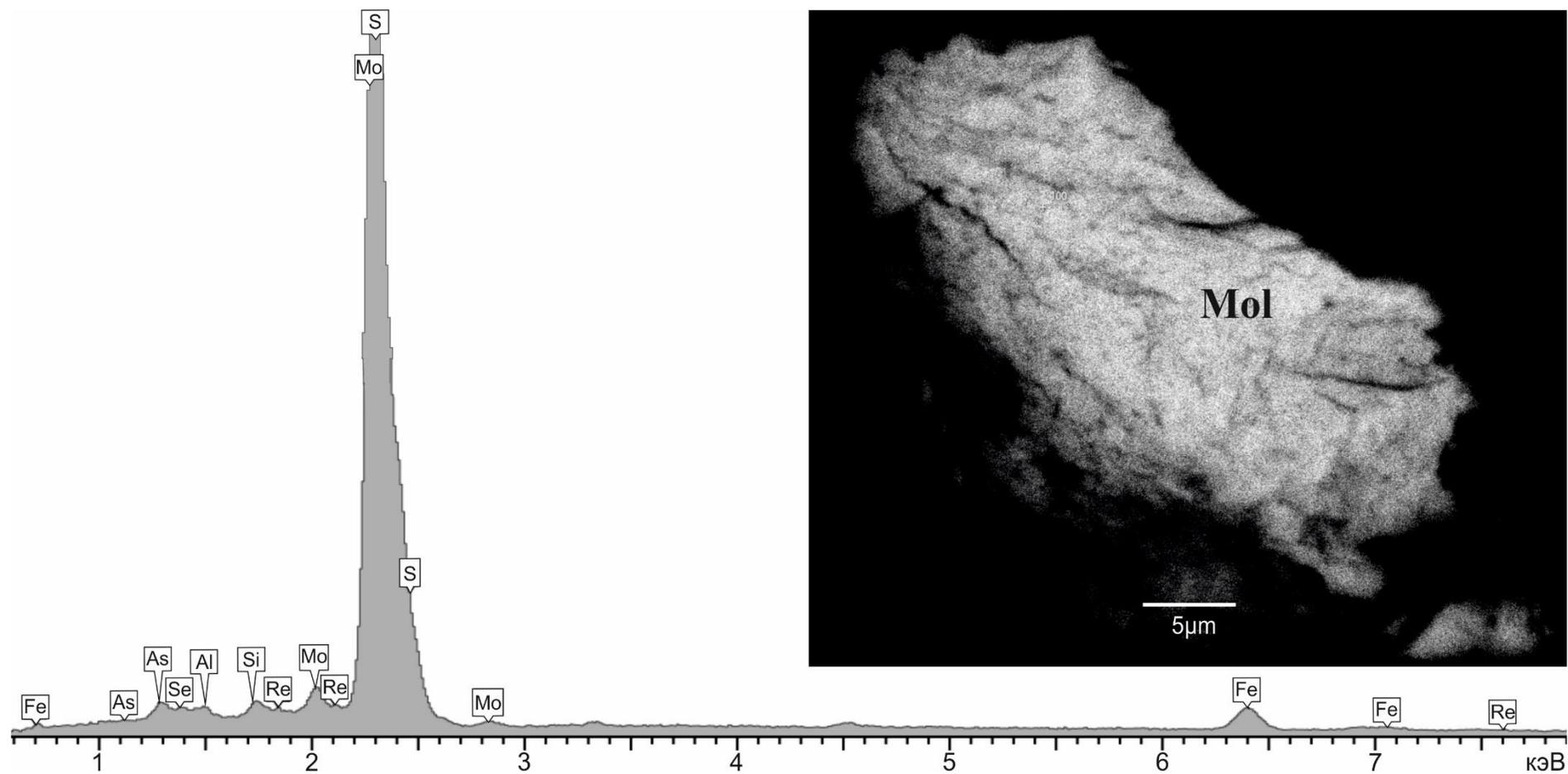
**Рис 5.8.** Микрофотография коллоидной поверхности зерна измененного пирита (Py) с сорбированными Re, Mo, U и соответствующий спектр состава в отмеченной точке анализа.



**Рис 5.9.** Микрофотография Re-содержащей Мо-сульфидной массы (светлое зерно в центре, Jor) с сорбированным U, Se и соответствующий спектр состава.



**Рис 5.10.** Микрофотография коллоидного с трещинами зерна Мо-Fe-сульфидного состава (Re-содержащий иордизит, Jor), с сорбированным U, Se и соответствующий спектр состава.



**Рис 5.11.** Микрофотография Re-содержащего молибденита (Mol) и соответствующий спектр состава.

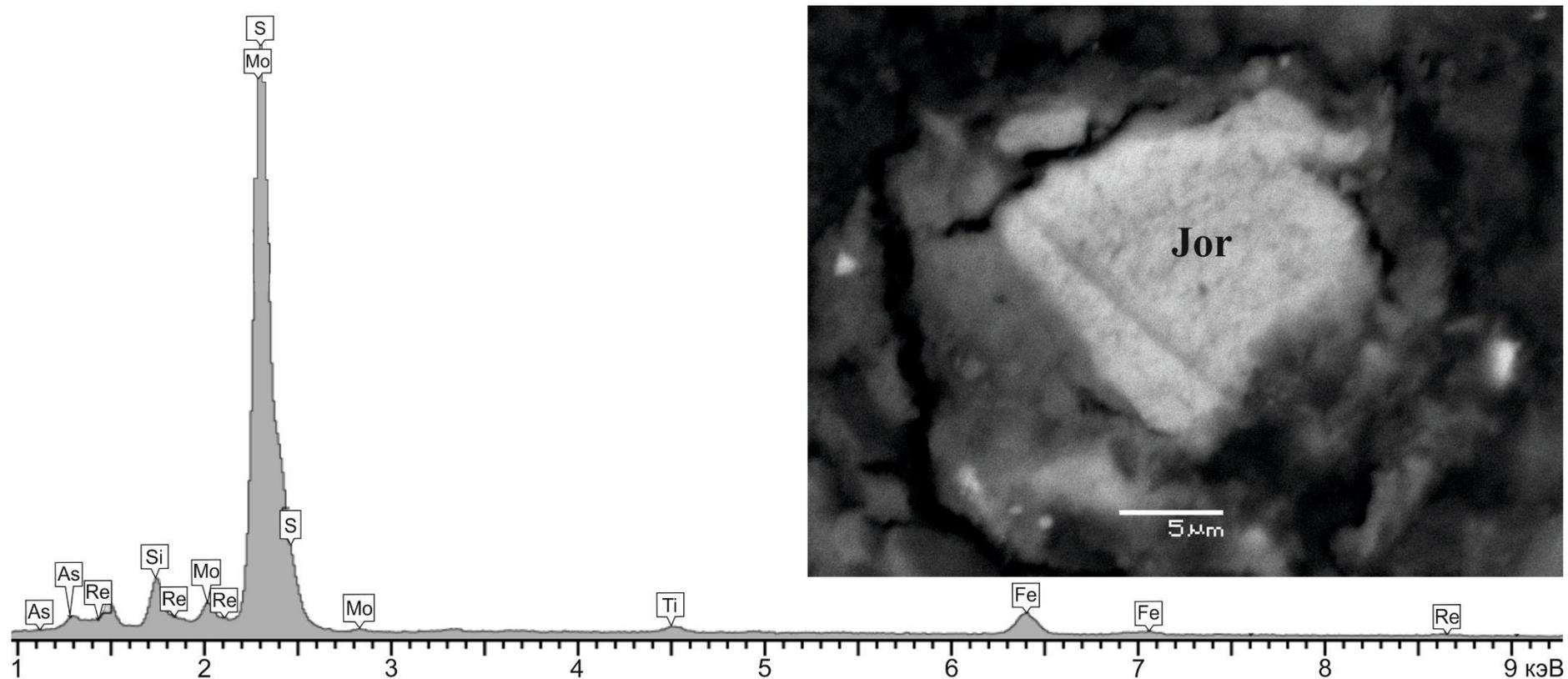


Рис 5.12. Микрофотография крупной частицы Мо-Fe-сульфида (иордизита, Jor) с примесью рения и соответствующий спектр состава.

**Таблица 5.2.** Минеральный состав рудных проб по результатам изучения методом АСЭМ

№ п/п	№ обр.	Литологическая характеристика	Минеральный состав
1	BZ-21	Песок среднезернистый алевритистый, темно-серый, плотный, с примазками сульфидов	Джаркениит, фрамбоиды пирита, Se-пирит (до 8 масс. % Se), пиритовые микроконкреции с примазками алюмосиликатов, касситерит, галенит, псевдоморфозы пирита по ископаемой древесине, анатаз
2	BZ-22	Частое переслаивание тонких (п.мм) слоев черного угля и песка тонкозернистого, почти черного	Ильменит с включением монацита, халькопирит, пирит с примесью Co (до 7 масс. %) и Ni (до 15 масс.%), титаномагнетит, циркон
3	BZ-12	Уголь черный с тонкими (1–2 мм) прослойками сульфидов	Рабдофан, джаркениит, клаусталит, сфалерит с примесью Cd (до 8 масс. %), Se-пирит, пирит, иордизит, молибденит, U-содержащий иордизит в углистой частице, сульфидная масса, с Re, U, Mo
4	BZ-1	Песок средне-крупнозернистый темно-серый, глинистый, обводненный	Уранинит (в пирите), сфалерит, циркон, пирит, титаномагнетит с оторочкой и прожилком пирита, анатаз, фрамбоидальный пирит
5	BZ-23	Глина темно-серая до черной	Рабдофан с примесью U (до 3 масс.%), циркон, пирит, фрамбоидальный пирит
6	BZ-15	Переслаивание угля черного и песка разнозернистого (мелко-крупнозернистого) темно-серого до почти черного (слойки ~1 см)	Колломорфная корка на пирите с U (~1 масс. %) и Re (~0.5 масс.%); циркон (до 2 масс.% U); колломорфный иордизит с Re (до 1 масс.%), U (до 1.5 масс.%) и Se (до 1.5 масс.%)

**Таблица 5.3.** Химический элементный состав (масс. %) аксессуарных минералов, сульфидов и селенидов в песках рудных интервалов, по данным микроанализа

№ анализа	минералы	O	Si	Fe	S	Se	Ti	Co	Ni	Pb	Sn	Zr
1	Se-пирит			45.63	46.29	8.08						
2	Se-пирит		1.08	36	27.4	35.5						
3	касситерит	17.65	0.63	1.35	0.98					6.84	70.04	
4	циркон	35.14	15.71									49.15
5	ильменит	37.02		13.25			49.73					
6	джаркениит			21.96		74.81		1.74	1.49			
7	джаркениит			28.21		71.79						
8	клаусталит			3.01		26.2				70.79		

Примечание: в анализе №1 определена также примесь Al (2.51масс. %).

**Таблица 5.4.** Химический элементный состав редких рудных минералов и частиц песка (масс. %) по данным ЭДС анализа

№ анализа	Что анализировалось	O	Si	Al	Ca	P	Fe	S	Se	Mo	Re	U	Ti	V	As	Zn	Ce	Nd	Y	Th
1	ксенотим /рис.5.2. т.2/	41.3	5.7		2.74	19.6	1.41					3.06							18.89	
2	монацит /рис.5.2в/	33.3	0.86		0.89	14	4.19	2.73					2.8				21.2	10.5		6.21
3	вросток уранинита в пирите /рис.5.5а/	12.4			0.88		30.8	35.3				20.7								
4	рабдофан /рис.5.5б/	37.3	1.78		2.71	4.75	17.6	22.9				5.8					1.38	2.53		
5	углистая частица с U /рис.5.6/	29.4	2.1	1.75			13.1	38		9.49		2.85	0.83	1.05		1.46				
6	Al-Fe-фосфо-сульфатная масса на Al-Si-частицах с U и Mo /рис.5.7/	49.4	2.37	7.87	0.17	8.19	14.1	9.26		5.09		1.87	0.23	0.24	0.53	0.62				
7	корка измененного пирита с Re и U /рис.5.8/						42.7	53.9		2.6	0.26	0.44			0.16					
8	Mo-сульфидная масса /рис.5.9/	36.5	1.07	1.25		0.52	3.98	12.5	0.69	39.6	1.25	0.72	0.47		1.44					
9	иордизит /рис.5.10/	6.91	2.07	1.32			8.91	14.4	1.53	55.9		1.4	0.72		3.07	1.46				
10	иордизит /рис.5.12/		3.18	1.71			5.16	17.1		68.4	1.65		0.99		1.84					
11	молибденит /рис.5.11/						3.9	23.4	0.83	68.1	1.28				1.73					

Примечание. В анализах также определены элементы (масс. %): № 1 – Sc (3.24), Er (4.03); № 2 – Pr (3.3); № 4 – Dy (3.32); № 9 – Co (1.08), Ni (0.92), K (0.32); № 11 – Co (0.53), Ni (0.27).

Исследование геохимических ореолов (см. Гл. IV) показало, что повышенные концентрации Re ( $>0.5$  г/т), помимо участков с максимальными концентрациями всех рудных элементов, обнаруживаются также в интервалах практически без U и Mo. Это позволило предположить, что рений на месторождении присутствует в нескольких формах. Что убедительно подтвердили результаты эксперимента по последовательному выщелачиванию основных рудных компонентов, приведенные в предыдущей главе. Было установлено, что основная часть Re (56%) связана с органическим веществом, и значительная часть Re (30%) представлена ионообменной формой. Именно такой, ионообменной, формой можно объяснить присутствие рения в составе измененной поверхности зерна пирита (колломорфная корочка, рис. 5.8).

### 5.3. Выводы по минералогии руд

Главной особенностью минерального состава руд является, прежде всего, широкое развитие *дисульфидов железа*. Наиболее часто они представлены пиритом разнообразной морфологии, и значительно реже встречается марказит. Сравнительное изучение распространения этих двух форм дисульфидов железа было проведено ранее в песчаниковых месторождениях урана роллового типа, включая палеодолинный подтип (Reynolds, Goldhaber, 1983). Полученные данными авторами результаты привели к выводу о широком развитии марказита в абиогенных обстановках, а пирита – в обстановках с участием биогенных факторов, где широко развиты его фрамбоидальные формы и происходит замещение растительных фрагментов.

Заметно более широкое, преобладающее над марказитом, развитие пирита в рудах Брикетно-Желтухинского месторождения, вероятно, связано с участием биоты (прямым или косвенным) в процессах образования пиритовых скоплений в песчаных породах. Значительная часть пирита, по-видимому, дорудная, однако близкая ко времени образования руд. Дорудный пирит представлен фрамбоидами, которые сформировались в результате процессов бактериальной сульфат-редукции в раннем диагенезе. Бактериальное восстановление сульфатов, поступавших, вероятно, из эксфильтрационных вод, обеспечило возрастание концентраций

сульфид-иона вблизи зон разломов, уходящих в известняковый “фундамент” и поставлявших напорные термальные воды.

Воздействие глубинных флюидов на рудовмещающие породы запечатлено в морфологии крупных куполообразных рудоносных структур, диаметром до 500 м и высотой до 50 м, вмещающих богатые U, Mo, Re и Se руды, обсуждение природы таких структур приведено в главе III и IV (рис. 3.8–3.10, 4.8– 4.11).

На глубинное, вероятно связанное с эндогенными (магматическими?) факторами, происхождение термальных вод, участвовавших в рудообразовании, указывает обогащение руд селеном, по крайней мере, на ранних этапах формирования пирита (о чем свидетельствует рис. 5.4а). Источником серы также служило углистое вещество рудовмещающих толщ, поскольку во всех случаях ЭДС-анализа углистых частиц в них всегда присутствовала сера. Кроме того, присутствие серы в составе различных углей, в том числе бурых, широко известно.

Более ранние исследования U-Se-Mo месторождений подобного типа, локализованных в песчаниках карбонатно-глинистых толщ (Каширцева, 1970; Гидрогенные..., 1980), сообщали, что роль восстановительного фактора в бескислородной подзоне месторождения сыграли сообщества автотрофных микроорганизмов, извлекающих и перерабатывающих углерод из минеральных форм – карбонатов осадочных толщ. Прежде всего, это сульфатредуцирующие бактерии, использующие сульфатную серу в процессах своей жизнедеятельности. Это объясняет обилие сульфидной минерализации, наблюдаемой нами в рудных образцах.

Присутствие марказита (~0.5 масс.%), по мнению (Reynolds, Goldhaber, 1983) тяготеющего к абиогенной среде, установлено нами в одном из самых богатых рением интервалов (90.2 г/т, проба BZ-15) разреза месторождения. В той же пробе были определены максимальные содержания серы (8.6 масс. %), урана (580 г/т), железа (10.5 масс. %), а также гипса (6.8 масс. %), что подчеркивает относительно высокие значения фугитивности кислорода  $f_{O_2}$  при минералообразовании (т.е. наличие кислородных соединений).

Высокие содержания каолинита также требуют специального обсуждения. Как правило, подобные высокие содержания каолинита в осадочных породах пространственно и генетически тесно связаны с корами выветривания

кристаллических пород. Особенно часто это наблюдается в пределах осадочного чехла Восточно-Европейской платформы (ВЕП). При образовании каолинитовых кор выветривания состав материнского субстрата может варьировать от кислых пород (гранитов, плагиогранитов, гранодиоритов, гнейсов) до пород основного состава (базальтов, габброидов). Каолиниты кор выветривания могут сформировать залежи непосредственно над материнской породой или образовать переотложенные залежи, в результате размыва первичной коры выветривания и транспортировки каолинита на относительно дальние расстояния. Наличие значительного количества другого глинистого компонента – смешанослойных образований иллит-сметитового состава обычно характерно для переотложенных глин (Wilson, 2013).

Результаты количественного рентгенофазового анализа, выполненного для руд богатых рением (см. табл. 5.1), свидетельствуют об увеличении (более, чем на порядок) величины содержания альбита при переходе от богатых Re руд (~10 г/т) к очень богатым рудам (90 и 150 г/т Re), одновременно довольно заметно возрастает содержание хлорита и каолинита. Таким образом, можно отметить, что повышенные содержания в породах Re, Mo и Ni связаны с присутствием в них ассоциации минералов (пирит – альбит – хлорит), характерной для метасоматитов многих гидротермальных месторождений Au, U, полиметаллов. Особенности распределение повышенных содержаний урана также позволяют выделить ассоциацию сопутствующих этому элементу минералов (пирит – микроклин – смешанослойный иллит-сметит – гипс) и отметить сходное с ураном поведение Mg. Всё вместе может указывать на проявление процессов, близких к гидротермальной аргиллизации силикатных пород. Развитие, как сульфидов, так и сульфатов в рудах, богатых Re, Mo и U, может быть индикатором гидрогенного рудообразования в условиях подвижного фронта окисления/восстановления. Вместе с тем, рыхлое, нелитифицированное состояние пород не позволяет выявить взаимоотношения минералов микроскопическими методами.

Происхождение высоких и аномально высоких концентраций широкого спектра микроэлементов (Re, Mo, U, Se, Ni, As, Co, V, Pb, Y, Cu, Tl и Ag) в богатых рениевых рудах Брикетно-Желтухинского месторождения может быть объяснено с привлечением различных факторов, однако во всех случаях такое их распределение обусловлено сходством поведения этих элементов и рения. Во-первых, эти элементы

генетически родственны рению: известно сходное их поведение в растворах они осаждаются в результате действия одинаковых физических или химических факторов, приводящих к разрушению их комплексных соединений; входят в состав одних и тех же сульфидных минералов или их ассоциаций. Во-вторых, в случае сорбционного накопления на углистых или глинистых частицах, когда возможно не только одновременное, но и разновременное осаждение всех этих элементов, часть из них может быть парагенетически связана с рением.

Сульфидная и оксидная минеральные формы Re (зерна до 2–3 мкм), предполагаемые в рудах Добровольного месторождения Зауралья (Халезов, 2009), в наших образцах не встречены.

Характер распределения Re на Брикетно-Желтухинском месторождении близок к тому, что ранее установлен на Далматовском, Добровольном и других месторождениях палеодолинного типа в Зауралье. Рений тяготеет к богатым по урану ( $> 0.06$  масс. %) и Мо рудам, где обычно  $C_{Re} = 0.5–5$  г/т (max = 57 г/т). Месторождения эти приурочены к глубоко врезанным (до 150 м) палеодолинам юрского возраста, прорезающим триасовые вулканиты базальт-риолитовой формации и литифицированные породы палеозойского складчатого фундамента (уралиды) с локально развитыми известняками (Халезов, 2003; Халезов и др., 2009). Палеодолины выполнены слабо литифицированными осадками, перекрытыми мощным чехлом мезокайнозойских осадочных образований. Лентовидные рудные тела залегают на глубине 360–510 м и приурочены к сероцветным породам с растительным детритом (Халезов, 2009). В рудах наиболее крупного, и почти полностью отработанного за истекшие 20 лет, Далматовского месторождения в повышенных концентрациях присутствуют: Re, Mo, Se, Zn, Ni, Co, V, Sb, As, Hg, Sc, Y, TR, Zr, Th, но они не извлекаются.

Рудные тела, выявленные на Брикетно-Желтухинском месторождении, имеют форму классического ролла и формы ореолов распространения рудных элементов, характерные для песчаниковых месторождений урана палеодолинного типа (с минерализацией восстановленного урана).

Обсуждая изученные нами, богатые U-Mo-Re руды на Брикетно-Желтухинском месторождении по результатам проведенных исследований (главы

IV и V), необходимо отметить, что их минеральный состав был существенно уточнен:

1) для **урана**, кроме дисперсных оксидных фаз, установлено его присутствие в составе акцессорных минералов: циркон, ксенотим, монацит и РЗЭ-фосфат (~5.8% U). В дополнение к ранее известным минеральным формам урана  $U^{4+}$ , проведенными исследованиями была выявлена его легкоподвижная уранильная(?) форма за пределами рудного тела в ореоле распространения рения (богатые Re участки); здесь же установлена минеральная ассоциация, сопутствующая повышенным содержаниям урана (пирит – микроклин – смешанослойный иллит-сметит – гипс);

2) для **молибдена** установлены его сульфидные формы, всегда содержащие Fe: кристаллическая – Fe-содержащий молибденит (до 4% Fe) и его аморфная разновидность – иордизит (~ 5–9% Fe); в их составе всегда присутствует Re, часто – примеси Se, As, Zn, Co, Ni (до 1.5%). В богатой Re руде только около половины содержащегося молибдена находится в минеральной форме (Fe-молибденит); остальная его часть представлена преимущественно в органическом веществе (см. Гл. IV); слабосвязанную здесь форму Mo (n%) мы соотносим с плохо окристаллизованным веществом дисперсных Mo-сульфидных образований;

3) в составе минеральных фаз **рений** зафиксирован в молибдените (~1.3 % Re) и в иордизитовой массе (~1.7 % Re). Основная часть Re связана с органическим веществом углистой массы (см. Гл. IV). Установлена тенденция накопления Re (от 6.3 до 30.0 г/т) в ряду от глинистого и сульфидного цемента до ультратонкой угольной фракции. Это рассматривается нами как действие сорбционного барьера, концентрирующего Re в глинистом и углистом веществе (ионообменная форма);

4) минеральные формы **селена** в рудах представлены Se-пиритом, клаусталитом (PbSe) и селенидом железа джаркенимом ( $FeSe_2$ ), ранее не известным на данном месторождении.

В последние годы ряд публикаций (Дойникова, 2016, 2017, 2020; Min et al., 2005; Cai et al., 2007; Wülser et al., 2011; Zhao et al., 2018) по минералогическому исследованию урановых руд из песчаниковых палеорусловых месторождений приводит авторов к выводам о биогенном формировании  $U^{4+}$ -минералов (настуран, коффинит, нингиоит). Учитывая биогенный аспект уранового рудообразования в

зоне гипергенеза, в случае рудовмещающих песчаных толщ Брикетно-Желтухинского месторождения можно предположить значительное/решающее влияние на процессы миграции и фиксации рудных элементов подстилающей карбонатной толщи. Её известняки и доломиты являются питательной средой для сообщества автотрофных микроорганизмов, которые извлекают и перерабатывают углерод из минеральных форм. В бескислородной подзоне месторождений, как уже отмечалось (Каширцева, 1970; Гидрогенные..., 1980), эти микробы могут играть роль восстановительного фактора.

На месторождении отмечено участие в рудообразовании вод глубинной циркуляции, на что указывает присутствие Se-минерализация; возможно, это внесло дополнительный вклад в термальный режим и конвекцию вод в рудовмещающих песчаниках.

На данном этапе изученности руд Брикетно-Желтухинского месторождения преимущественная связь рудных элементов (Re и Mo) с органическим веществом требует дальнейшего уточнения. Скорее всего, эту связь следует отнести на счёт значительного влияния подстилающих карбонатных пород, непосредственно на которых локализованы толщи песчаников; что обусловило активность автотрофной микробиоты в рудовмещающем горизонте песков. Уточнение роли автотрофных бактерий в процессах рудообразования требует дополнительного изучения.

Таким образом, изложенные выше результаты исследований обосновывают *третье защищаемое положение:*

**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 джаркенином FeSe<sub>2</sub>;
- **уран** – установлен в составе аксессуарных минералов: циркон, ксенотим, монацит и РЗЭ-фосфат (3–6 мас. % U); встречается оксид урана (~1 мкм) в пирите.

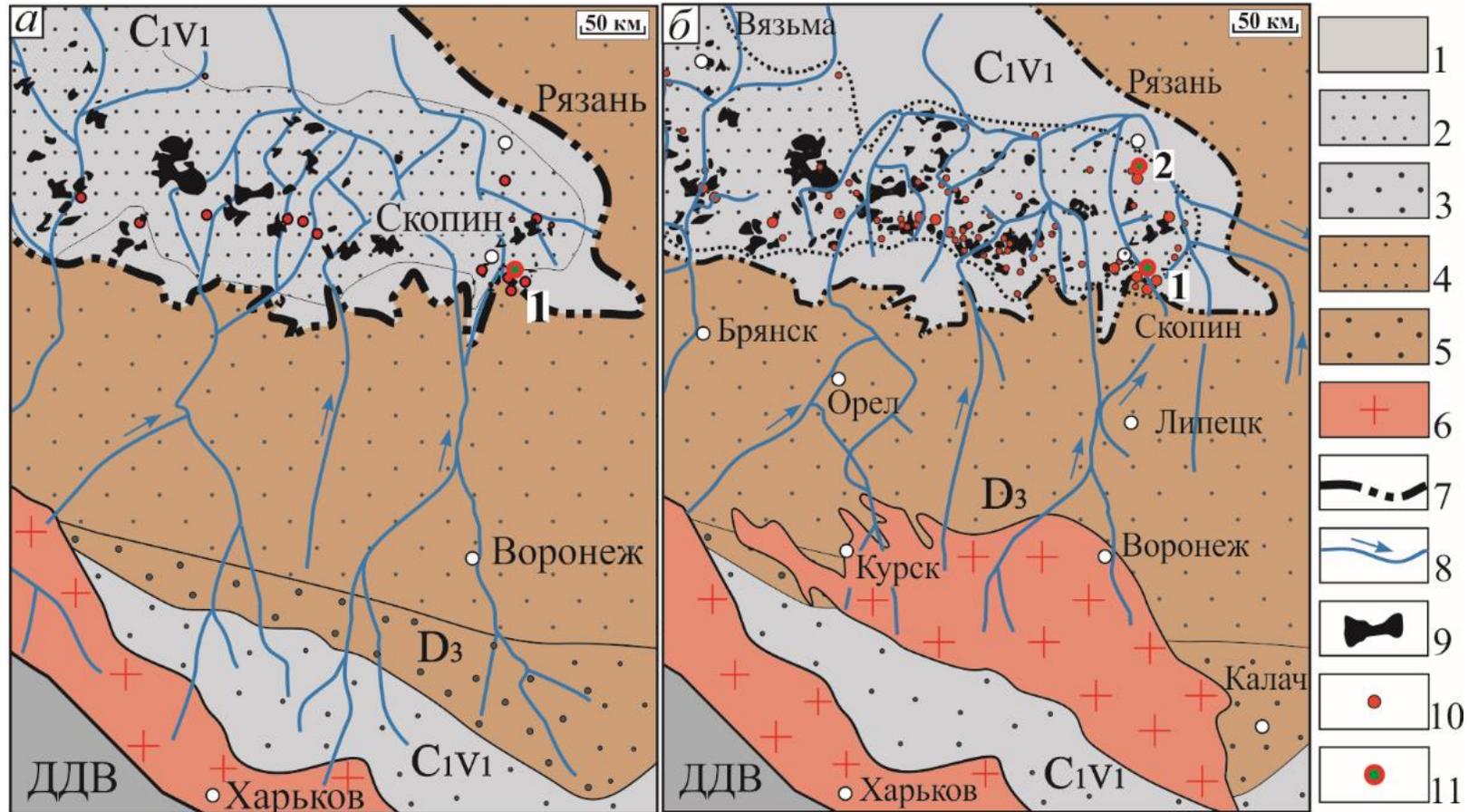
## ГЛАВА VI. ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РУДООБРАЗОВАНИЯ

### 6.1. Предварительные замечания

Отложения рудоносной бобриковской свиты, представленные не литифицированными и крайне слабо литифицированными, разномерными, умеренно и плохо сортированными песками, формировались в конце раннего – первой половине среднего визе. Их накопление происходило на фоне средневизейской трансгрессии, наступившей вслед за ранневизейским осушением территории и региональным перерывом осадконакопления. Теплый влажный климат тропической зоны способствовал углеобразованию. Однако в позднем визе гумидизация климата уступила место его аридизации (угли исчезают из разреза) (Швецов, 1954; Геологическая карта ..., 1968). Паралическая угленосность, весьма характерная для каменноугольного периода, наряду с накоплением сероцветной толщи высокопроницаемых, плохо отсортированных песков и их фоновой пиритизацией, в дальнейшем стала определяющим фактором, обеспечившим будущую промышленную рениеносность Брикетно-Желтухинского месторождения.

Переносимый речными потоками в мелководный морской бассейн аркозовый, а также, в подчиненном количестве, пепловый вулканомиктовый материал, вероятно, были обогащены тяжелыми металлами, которые накапливались в терригенных осадках в малых надкларковых концентрациях, отчасти сорбируясь растительным детритом и глинистыми частицами.

Ранее было высказано предположение (Карась и др., 2017) о существовании в районе северного плеча Днепровско-Донецкого рифта области размыва, где в визейское время мобилизовались металлы (Re, Mo, U), которые впоследствии переносились речными потоками на север, в район рассматриваемого месторождения. Такое предположение представляется маловероятным, т.к. на пути следования предполагаемых потоков находилась суша – крупный Воронежский выступ кристаллических пород фундамента Восточно-Европейской платформы (ВЕП) (рис. 6.1; рис. 3.2 в гл. III).



**Рис. 6.1.** Палеогеографическая реконструкция источников сноса обломочного материала для рек, питающих Подмосковский бассейн в ранне-среднедевонское время, на основе (Палеогеоморфологический ..., 1983; Махлина, 1993): а – схема по (Карась и др., 2017); б – схема по нашим данным (фрагмент рис. 3.2).

1–3 – нижне-среднедевонские отложения: 1 – преимущественно глинистые (озерные и мелководно-морские фации), 2 – преимущественно песчаные (дельтовые фации палеорек, бобриковский горизонт), 3 – песчаные (аллювиальные фации); 4 – верхнедевонско-нижнекаменноугольные карбонатно-терригенные отложения в области размыва; 5 – верхнедевонские терригенные отложения (прибрежно-морские фации) в области размыва; 6 – выступы докембрийского кристаллического фундамента в области размыва; 7 – граница визейского Подмосковского бурого угольного бассейна; 8 – русла палеорек с направлением течения; 9 – болота (залежи бурого угля); 10 – проявления урана; 11 – месторождения с рениевой минерализацией (1 – Брикетно-Желтухинское, 2 – Алексеевское урановое проявление). ДДВ – Днепровско-Донецкая впадина.

## 6.2. Существующие взгляды на генезис и возраст оруденения

Во время более раннего изучения Брикетно-Желтухинского месторождения различными группами исследователей (включая группы ведущих геологов-уранщиков ВИМСа и ВСЕГЕИ) не было выработано единой точки зрения на генезис и возраст формирования оруденения. Поэтому рассмотрим здесь имеющиеся представления о генезисе и эволюции месторождения в контексте вновь полученных данных. В целом, как и для большинства урановых месторождений в терригенных толщах, генезис Брикетно-Желтухинского месторождения трактуется либо как сингенетичный осадконакоплению, либо как инфильтрационный, либо как результат осаждения руд из восходящих растворов.

Группой ученых отдела урановых месторождений ВСЕГЕИ (Грушевой и др., 1999) отмечалось «наличие признаков зоны окисления в разрезах керна», и на этой основе они старались рассмотреть формирование оруденения в виде, близком к классическим схемам формирования гидрогенного «эпигенетического» оруденения зон пластового окисления в Притяньшаньском регионе.

Сторонниками **сингенетической модели** формирования рениеносных урановых месторождений (специалисты ВИМСа С.Д. Расулова, Г.А. Тарханова, В.В. Авакумов) предполагается близседиментационное накопление промышленных концентраций U, Mo и Re в результате сорбции углисто-глинистым веществом в раннем карбоне (Расулова и др., 2007).

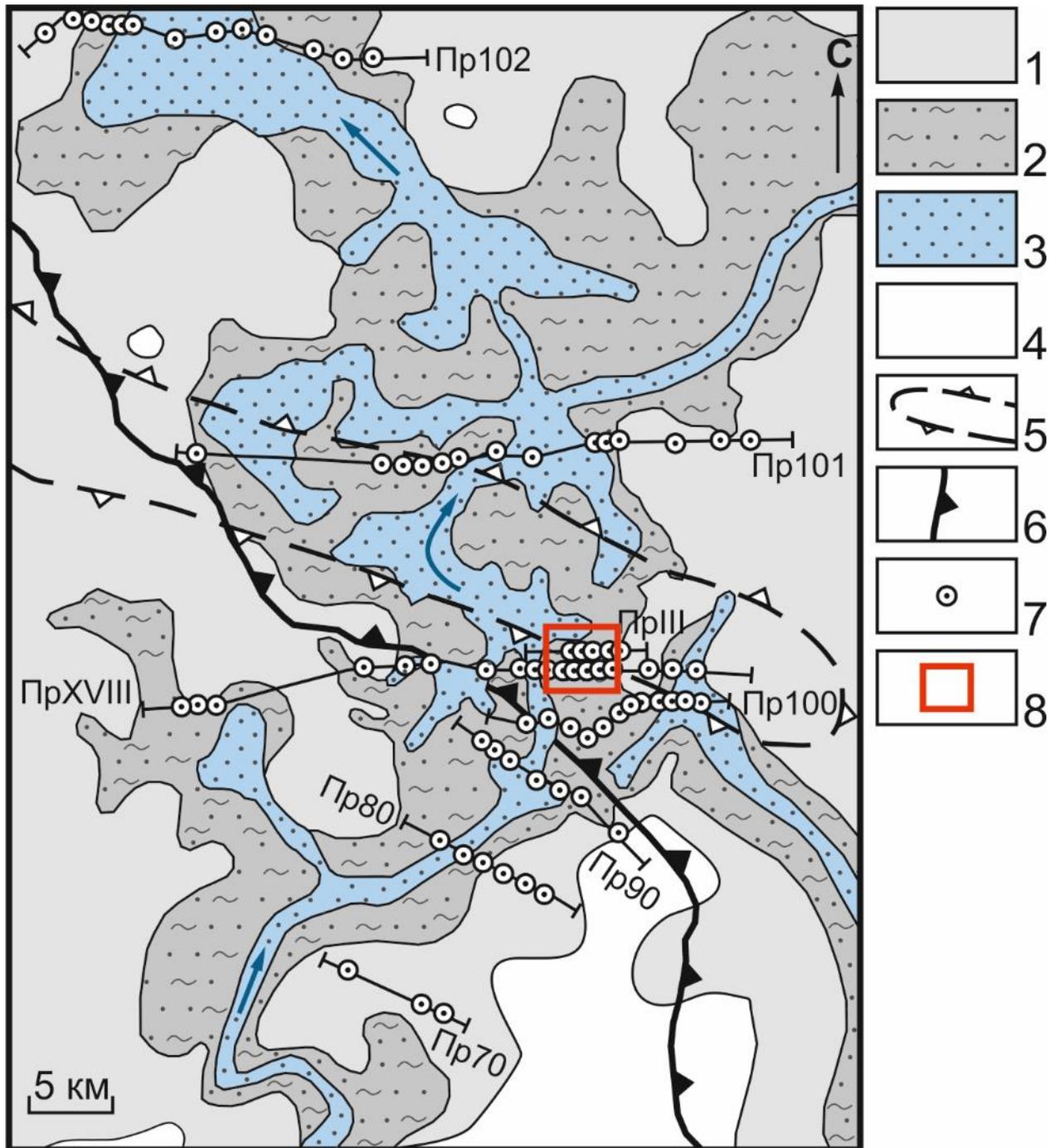
Согласно **эпигенетической модели** формирования руд (Карась и др., 2017), основной объем богатого рениевого и U–Mo оруденения был сформирован в неоген–четвертичное время, при просачивании и миграции кислородосодержащих вод в бобриковские отложения через современные речные врезы, расположенные к северу от рассматриваемого месторождения. При этом происходил перенос Re, U и Mo вниз по разрезу песчаной толщи и накопление этих элементов на первых же встреченных восстановительно-сорбционных и восстановительно-сорбционно-щелочных барьерах в палеорусловых/дельтовых отложениях бобриковской толщи, с частичным просачиванием в нижележащие карбонатные породы.

### 6.3. Факторы формирования U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения

Субпромышленные послойные скопления U ( $\pm$ Mo, Re), связанные с углистыми и глинистыми горизонтами, накопились при осадконакоплении и на стадии диагенеза (I этап). Основные промышленные концентрации рудных элементов U ( $\pm$ Mo, Re) формировались на эпигенетической стадии – после накопления бобриковского горизонта и перекрывающих его водоупорных слоев окварцевания и глин. Это происходило в результате гидрогенного минералообразования при латеральном движении кислородсодержащих подземных вод по высокопроницаемой толще плохо сортированных песков; нижним водоупором служила подстилающая карбонатная толща (II этап).

По нашим представлениям (Викентьев, Кайлачаков, 2020; Кайлачаков и др., 2020), основные промышленные U–Mo–Re руды сформировались процессами эпигенеза. Фильтрующиеся подземные воды переотлагали компоненты послойно–рассеянных рудных скоплений, сингенетически сконцентрированных в результате действия геохимических (сорбционный и восстановительный барьеры) и гидродинамических факторов (изменение скорости потока при вариациях проницаемости песков). Согласно выполненным оценкам для района месторождения (Карась и др., 2017), предполагаемый возраст инфильтрационных процессов, перераспределявших и отлагавших U, Mo, Re, Se и др. элементы рудной ассоциации, соответствовал среднекаменноугольному, пермскому и мезозойскому временным интервалам.

Важными факторами образования U–Mo–Re скоплений в породах осадочного чехла Русской плиты являются геоморфологический (долина Скопинской палеореки (рис. 6.2)), седиментационно-диагенетический и палеогидрогеологический, которые кратко рассмотрены выше. Эти факторы более детально охарактеризованы для сходных по генезису месторождений урана в песчаниковых толщах Средней Азии, Зауралья, юга Восточной Сибири (Лисицин, 1975; Кисляков, Щеточкин, 2000; Халезов, 2009; Кочкин и др., 2014). К важным факторам могут быть также отнесены тектонический и магматический (Грушевой и др., 1996, 1999). Из пяти крупнейших эпох тектономагматической активизации (Грушевой и др., 1996), осложнявших плитное осадконакопление, для Скопинского района наиболее значимыми могли

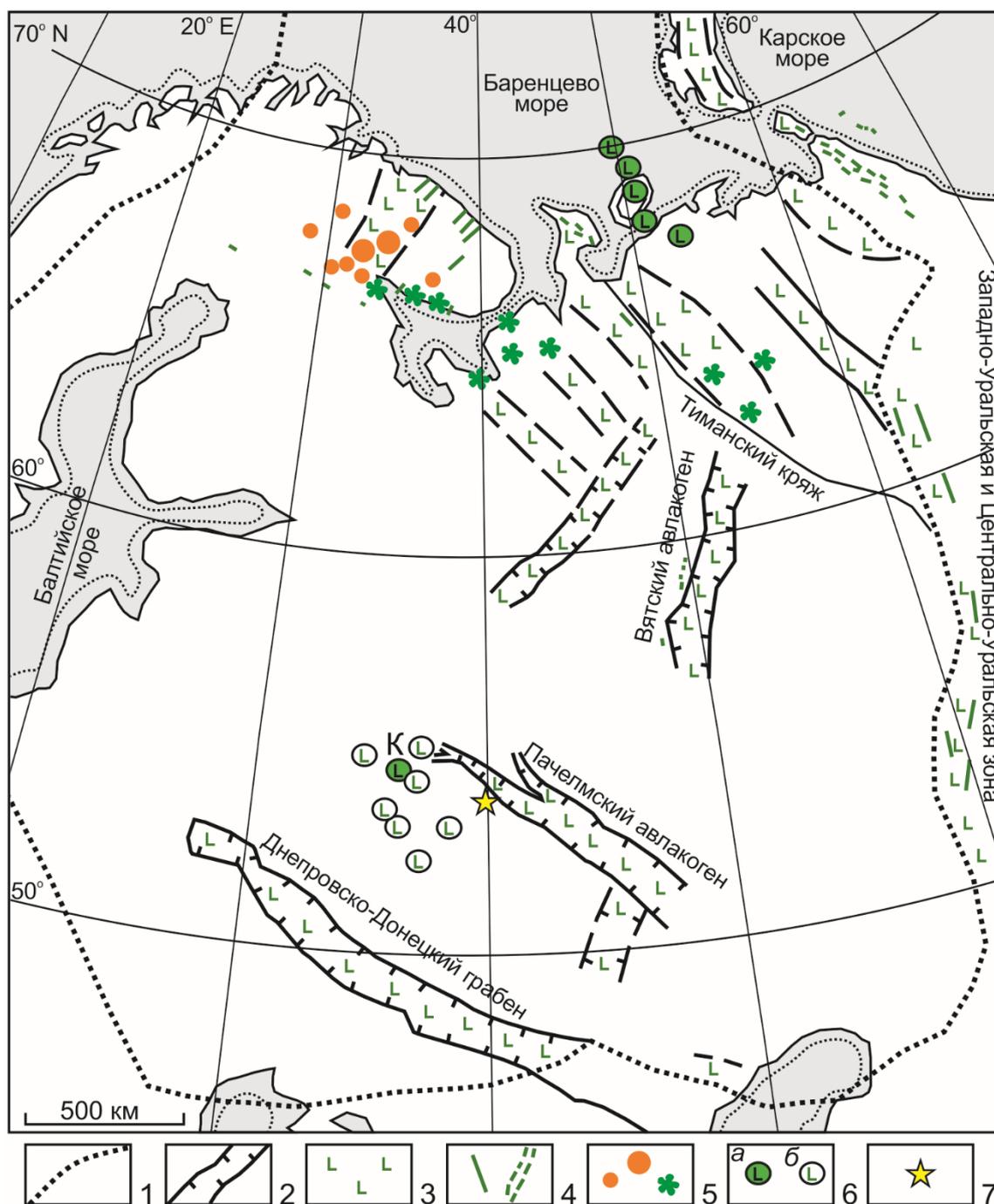


**Рис. 6.2.** Литолого-фациальная карта бобриковских отложений в районе Брикетно-Желтухинского месторождения по (Новгородцев и др., 2005ф) с дополнениями и изменениями.

1–3 – фации песчано-глинистых отложений: 1 – пойменная тонко-мелкозернистая, 2 – прирусловая мелкозернистая с прослоями и линзами углистых глин, углей, алевролитов, 3 – русловая разнозернистая с гравием и редкими прослоями глин; 4 – области отсутствия и размыва бобриковских отложений; 5 – контуры линейного поднятия, поперечного к речной долине; 6 – уступы в визейском палеорельефе; 7 – скважины; 8 – Брикетно-Желтухинское месторождение.

быть девонская, триасово-юрская, мел-палеогеновая и неоген-четвертичная. В центральной части и на юге ВЕП с девонским периодом связано подновление многочисленных глубинных разломов, и связан этап регенерации авлакогенов (Днепрово–Донецкий, Кировский, Доно–Медведицкий), с повторным их прогибанием (Грушевой и др., 1996; Иванова, Грушевой, 2009). Девонская активизация отличается проявлениями щелочных базальтоидов, трахибазальтов и щелочно-ультрасосновного интрузивного магматизма, в краевых частях, названных авлакогенов (Петров, 1969; Puchkov et al., 2016), в т. ч. на южном (Днепрово–Донецкий ареал) и восточном (Доно–Медведицкий ареал) флангах рудного поля. Базальтоидный рифтовый вулканизм действовал на обширном пространстве центральной и восточной частей Русской плиты. Это обусловило выделение здесь девонской Восточно–Европейской Крупной Магматической Провинции (КМП) (Милановский, 1996; Nikishin et al., 2002; Puchkov, 2002; Ernst, Bell, 2010). Интенсивный базальтоидный вулканизм отмечен в среднем–позднем девоне Донбасса (Пучков, 2010) (рис. 6.3). Весьма вероятно, что этот суперплюмовый процесс «оживил» структуры, входящие в ареал Восточно–Европейской КМП, – как Пачелмский авлакоген, так и его обрамление; подновил существующие в фундаменте разломы, обеспечив, таким образом, дренаж более глубинных сфер коры. Если учесть базальтоидно-трапповый характер магматизма, то вероятным могло быть и поступление флюидов из мантии. Магматизм на юго-востоке ВЕП активно проявился и в киммерийскую эпоху.

По данным (Иванова, Грушевой, 2009), неоднократные импульсы тектогенеза имели место в течение позднегерцинского (визе–ранний триас), киммерийского (поздний триас–ранний мел) и альпийского (с позднего мела) циклов: в авлакогенах и сопредельных частях ВЕП произошла инверсия с образованием сводов (Балаковский, Башкирский и др.) и крупных дислокаций на востоке платформы (Вятские, Саратовские, Доно-Медведицкие, Сокско-Шешминские и др.). Для Воронежского выступа и его сопредельных территорий, включая Пачелмский авлакоген, установлены деформации, являющиеся признаками как горизонтальных (Копп, 2004; Копп и др., 2010; Зыков, Полещук, 2015), так и вертикальных (Карта ..., 1997; Трегуб, 2002) движений, вплоть до современных.



**Рис. 6.3.** Девонская Крупная Магматическая провинция Восточно-Европейской платформы (Puchkov 2016, 2017) с дополнениями. Проявления базальтового вулканизма и связанные с ним рифтогенные структуры по (Nikishin et al., 1996, Stephenson et al., 2006, Terekhov et al., 2012, Ernst & Bell, 2010), дополнены по (Пучков, 2010, рис. 54); вулканические структуры, связанные с базальтовым вулканизмом дополнены по (Государственная ..., 2015, рис. 22).

1 - граница Восточно-Европейской платформы с окружающими фанерозойскими складчатыми поясами; 2 - рифтогенные грабены девонского возраста; 3 - базальты девонского возраста; 4 - девонские дайки и их рои; 5 - девонские щелочные и карбонатитовые интрузивные комплексы  $\circ$  и кимберлиты \*; 6 - девонские вулканические структуры центрального типа: а - установленные, включая бурение (К - Калужская структура), б - предполагаемые по данным геофизического зондирования; 7 - Брикетно-Желтухинское U-Mo-Re месторождение.

Активизация разломов кристаллического фундамента, деформации осадочного чехла на протяжении фанерозоя, очевидно, являлись отражением как глубинных геодинамических процессов в низах коры ВЕП, так и тектонической эволюции сопредельных складчатых областей: Урала – серия коллизий во второй половине палеозоя, а также в юре (Пучков, 2010); Альпийско-Гималайской системы – в мезо–кайнозой. Как полагают (Грушевой и др., 1996), на плитном этапе авлакогены и ограничивающие их разломы, трассируемые вверх по восстанию, являясь тектонически ослабленными зонами, могли служить путями движения восходящих термальных вод (рудоносных растворов). Такие воды могли поступать из нижних горизонтов чехла – эксфильтрационные хлоридные растворы/рассолы – или из подстилающего кристаллического фундамента. По завершении тектономагматических импульсов, включая период рифтового базальтового магматизма мантийной природы в позднем девоне, в составе циркулирующих растворов значимыми могли быть как постмагматические гидротермальные компоненты, так и мантийные флюиды. Подобными проводниками флюидов, вероятнее всего, были и крупные разломы вне авлакогенов, неоднократно подновляемые. Согласно сводкам (Грушевой и др., 1996; Иванова, Грушевой, 2009), радиологический возраст урановой минерализации месторождений Подмосковского бассейна оценивается как визе (~340 млн лет назад, соответствуя седиментации и диагенезу), средний триас (~240 млн лет), рубеж триаса и юры (~200 млн лет).

Девонский период на востоке ВЕП характеризовался крупномасштабным для плитных условий ареальным магматизмом, соответствующим крупной горячей точке – суперплюму (Пучков, 2010). Взаимосвязанная с ним активизация разломов фундамента, вероятно, и запустила процесс глубинной циркуляции флюидов (с соответствующим вещественным в них вкладом), став его своеобразным триггером. Последующие периоды ~240 млн. лет и ~200 млн. лет назад, вероятнее всего, отвечали процессам тектонической активизации, связанным с коллизионными событиями на Урале и в центральном сегменте Альпийско-Гималайского пояса.

Наиболее приемлемой для рассматриваемого объекта нам представляется **комбинированная син–эпигенетическая модель** образования этого месторождения палеодолинного типа. Она включает, с одной стороны, участие процессов «синхронных», близких по времени, осадконакоплению и диагенезу,

обеспечивающих частичную, относительно невысокую *субпромышленную* концентрацию металлов, серы и селена на геохимических барьерах. Это барьер *восстановительный* – за счет обилия растительного детрита, лигнитов; и барьер *сорбционный*, обусловленный наличием в осадочных слоях сапропелей, гумусового материала (основа бурых углей), глинистых отложений и железо–гидроксидов. Вмещающие эту суб-промышленную U ( $\pm$ Mo, Re) минерализацию песчаные отложения (бобриковская толща) сформировались в поймах меандрирующих небольших рек, в насыщенных растительными остатками старицах, дельтах, лиманах или в теплом мелководном море, изобилующем отмелями, у северного края холмистой суши Воронежского кристаллического массива, переходящей в пологое морское побережье.

С другой стороны, промышленно значимые *рудные концентрации* формировались гипергенными процессами, на *эпигенетической стадии*, в результате *водородного* минералообразования, кислородсодержащими подземными водами в толще проницаемых песков. Помимо участия названных выше сорбционно-геохимических барьеров (прослой углей и гумусового материала), важными элементами модели становятся *восстановительные барьеры*, возникающие на фронте поднимающихся вод глубинной циркуляции. Эти воды мигрировали в фаменских известняках вверх по разломам, 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. 6.4). 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.

#### 6.4. О физико-химических условиях минералов U, Mo, Re, Se

По данным А.И. Перельмана (*Гидрогенные ...*, 1980; Перельман, Касимов, 1999), элементы Se, Mo, Re – главные спутники урана в гипергенезе. По особенностям миграции в гипергенных условиях эти элементы находятся в одной

группе: они подвижны в окислительной обстановке и инертны в восстановительной. U, Mo, Se, Re активны при биогенной и водной миграции, осаждаются на восстановительном барьере.

Селен мигрирует в форме комплексов  $\text{Se}^{4+} - \text{HSeO}_3^-$  и  $\text{SeO}_3^{2-}$ , которые сорбируются гидроксидами железа, глинистыми минералами и органическим веществом. Согласно А.И. Перельману (Перельман, Касимов, 1999), накоплению селена способствует щелочная среда. Следовательно, присутствие селена в рудной толще характеризует условия повышенной щелочности. В нашем случае возникновению таких условий способствовала мощная подстилающая карбонатная толща, а также, по-видимому, поступление через разломы глубинных вод с щелочным рН. Селен менее подвижен, чем геохимически близкая ему сера, и его соединения легче восстанавливаются. «Во многих системах, где сера подвижна в сульфатной форме, селен может быть только в форме малоподвижной: элементарный Se или селениды» (Перельман, Касимов, 1999). Ограниченная подвижность препятствует рассеянию селена на значительное расстояние от углеродистых прослоев и линз (органические остатки обогащены серой и, отчасти, селеном). Это подтверждают и наши наблюдения кристаллов селенидов: клаусталита  $\text{PbSe}$  (см. рис. 5.4б) и джаркенита  $\text{FeSe}_2$  (см. рис. 5.1г, д), а также селенистого пирита  $\text{Fe}(\text{Se},\text{S})_2$  – в образце бурого угля (BZ-12). Как отмечалось, Se-пирит цементируется сульфидной массой беспримесного пирита (см. рис. 5.4а). Такие ассоциации показывают, что сера, по крайней мере, частично, осаждалась в виде сульфидов после кристаллизации селен-содержащих минералов. Ассоциация сульфидов и селенидов встречается нечасто (см. например, (Викентьев и др., 2019) и ссылки в ней) и, в нашем случае, может указывать на локальное развитие относительно окислительных условий (Xiong, 2003).

Учитывая положение областей устойчивости соединений серы, селена и кислорода на диаграммах Eh–рН: пирита, халькопирита, сфалерита, уранинита, ферросилита/джаркенита, клаусталита (Garrels, Christ, 1965; Saunders et al., 2016; Hough et al., 2019), а также коффинита и галенита (Wülser et al., 2011; Saunders et al., 2016), условия кристаллизации встреченных на месторождении ассоциаций сульфидов и минералов урана могут быть оценены как рН = 5.5–7, Eh = –0.3 ... –0.1 ( $t = 25^\circ\text{C}$ ,  $P = 1$  атм,  $P_{\text{CO}_2} = 10^{-2.5}$  бар). На умеренно высокий рН (> 5) указывает

преобладающее развитие пирита среди дисульфидов железа (Hough et al., 2019). На существенно восстановительные условия рудообразования (возможно возникавшие локально) указывает обилие и разнообразие сульфидной минерализации (пирит, марказит, сфалерит, халькопирит, галенит) в рудных образцах. Тяготение наиболее богатой урановой, молибденовой и ренийевой минерализации к растительному детриту и линзам бурых углей, а также преобладание колломорфных минеральных форм, наблюдаемых микроскопически, позволяют предполагать важную роль биогенного фактора в процессах рудообразования. На значительное участие бактериальной среды (биоты) указывает также обилие фрамбоидальных форм пирита, которые часто рассматриваются как результат бактериальной жизнедеятельности.

Молибден в биосфере мигрирует виде комплекса  $(\text{Mo}^{6+}\text{O}_4)^{2-}$ , который подвижен в окислительной нейтральной и щелочной среде, но его соединения малорастворимы в кислой среде. Соединения  $\text{Mo}^{4+}$  плохо растворимы. Повышенные содержания молибдена характерны для осадочных пород, обогащенных органическим веществом. Мо характеризуется высокой биофильностью концентрации элемента в живом веществе (Перельман, 1975). В песках проявляется его биогенная аккумуляция в гумусовых горизонтах. В гумидных ландшафтах с кислыми и нейтральными водами молибден слабо подвижен, поскольку сорбируется гидроксидами Fe и Al, частично фиксируется фосфатным веществом, на что указывает геохимическое родство Mo и P (Гл. IV, рис. 4.5), осаждаясь на восстановительных барьерах в глеевых горизонтах (болота, гумус).

Рений близок молибдену по химическим свойствам (Иванов и др., 1969); соединения  $\text{Re}^{4+}$  трудно растворимы, лишь некоторые соли  $\text{Re}^{7+}$  – легко растворимы. Рений активно участвует в биогенной и водной миграции. По А.И. Перельману (1999) «Водная миграция Re контрастна и аналогична миграции Mo, U, Se – он энергично мигрирует в кислородных водах и плохо в водах с восстановительной средой, осаждаясь, как и эти элементы, на восстановительном барьере». В гидрогенных месторождениях урана установлен парагенезис U, Mo, Se, Re, (V). Отмечается характерная связь Re с органическим веществом и повышенное его содержание в углеродистых сланцах, бурых углях, битумах и нефтях. Благодаря

воздушной миграции рения при вулканизме, бурые угли районов активного вулканизма наиболее обогащены рением.

### 6.5. Син-эпигенетическая модель образования Брикетно-Желтухинского месторождения

При образовании толщи песков бобриковского горизонта снос обломочного материала главным образом шел с Воронежского кристаллического массива в условиях жаркого гумидного климата (Викентьев, Кайлачаков, 2020). К потенциальным источникам рудных компонентов этой области питания визейских рек среди геологических комплексов могут быть отнесены следующие:

- 1) Для **U** – гранитоиды, в том числе, редкометалльные; серые гнейсы; мигматиты; щелочно-карбонатитовые ассоциации; черные сланцы;
- 2) Для **Mo** – гранитоиды; грейзеновые жилы и высокотемпературные гидротермальные проявления ( $Mo \pm Sn, W$ ); порфировые ( $Mo \pm Cu, Re$ ) рудопроявления;
- 3) Для **Re** – гранитоиды; черные сланцы (Юдович, Кетрис, 1994); возможное поступление из щелочно-базальтовых эффузивных и пепловых горизонтов (средний-верхний девон), из порфировых (внутриплитных) интрузивов субщелочного-щелочного и среднего состава;
- 4) Для **Fe** – зеленокаменные комплексы (метабазиты), ультраосновные породы, железистые кварциты.

*Первый этап.* Процессы разрушения пород Воронежского кристаллического массива обеспечивали поступление значительных количеств как «гранитофильных» (U, Mo, Pb, Y, PЗЭ), так и «базитовых» (Fe, Ni, Cu, Zn, Re, Co) элементов, мигрирующих в виде взвешенных частиц (обломочных и крупных коллоидных), а также в растворенном виде, вероятнее всего, в виде комплексных соединений.

Таким образом, в поймы, дельты и мелководный морской бассейн с интенсивно расчлененной поверхности кристаллического массива в условиях активной денудации и пенеппенизации рельефа поступал терригенный обломочный материал. В лагунных и шельфовых условиях к нему добавлялся карбонатный органогенно-детритовый и хемогенный материал. Среди упомянутых тяжелых металлов доминировало железо (элемент, наиболее подвижный в гипергенных условиях),

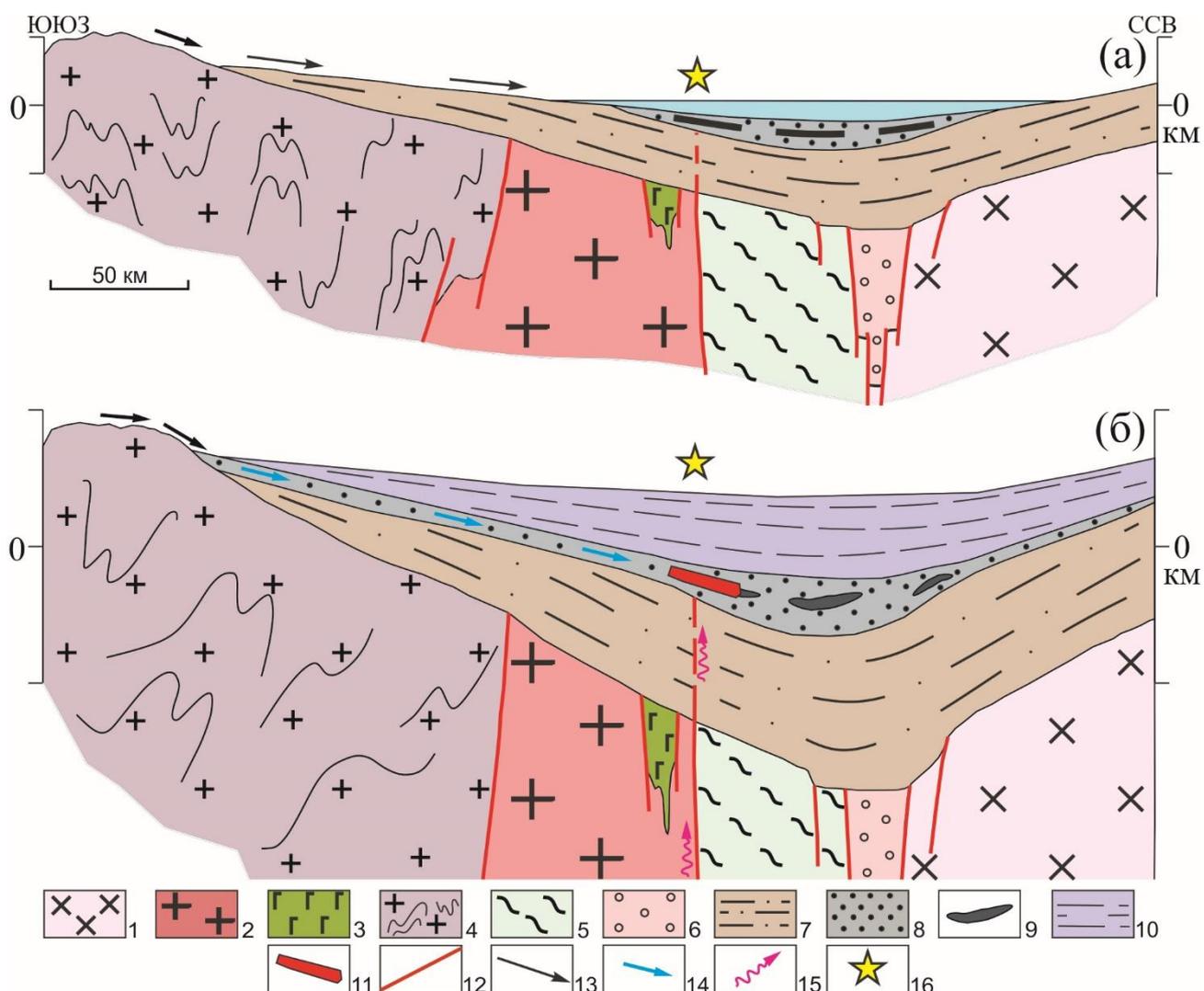
которое в условиях диагенеза послужило источником образования тонко рассеянной вкрапленности Fe-сульфидов. Основным источником серы послужила биогенная составляющая осадков; в случае прибрежно-морской седиментации преобладало поступление серы, образованной при биогенном восстановлении сульфат-иона морской воды (сульфат-редукция).

В старицах, заболоченных участках дельты, мелководных, богатых растительностью лиманах накопление терригенных пород периодически сопровождалось – особенно при наличии локальных застойных условий – биогенным седиментогенезом с развитием невыдержанных по латерали пропластков и линз торфа, углистых алевроитов и т.п. Углеродистые осадки в силу микроструктурных особенностей частиц растительного детрита (большая удельная поверхность) и наличия большого количества восстановленных форм углерода (в основном гумусовые вещества) выступали в качестве эффективного осадителя металлов, которые переносятся в истинных растворах и в виде комплексных соединений, в результате восстановительных реакций и сорбционных процессов (Юдович, Кетрис, 2011). Кроме растительных остатков, тяжелые металлы (Fe, Cu, Ni, Zn, Pb, U, Mo, Re) при диагенезе сорбировались глинистыми частицами, а также оксигидроксидами железа седиментационного и вторичного происхождения (в результате окисления сульфидов железа). Таким образом, на *первом этапе* формирования месторождения накопилась мощная толща существенно кварцевых, умеренно и плохо сортированных песков с участками палеорусловых отложений, которые соответствуют формам рудных тел (лентовидные в плане). Толща содержала послойно-рассеянные скопления металлов (Fe, Cu, Ni, Zn, Pb, U, Mo, Re), вероятнее всего, с относительно невысокой концентрацией, как этих металлов, так и серы (рис. 6.4а).

**Второй этап**, гидрогенно-эпигенетический (рис. 6.4б), вероятно, проявился много позже – с пиками активизации 240 и 200 млн лет назад (Викентьев, Кайлачаков, 2020) (Гл. III). То, что содержание U, Re и сопутствующих элементов (Mo, V, Y) отчетливо растет от группы песчанистых пород к алевроитистым глинам и буроугольным прослоям, указывает на преобладающий вклад осадительного фактора – присутствие растительного детрита, обеспечившего возникновение восстановительного барьера. Последовательное увеличение в этом ряду доли

органического материала позволяет предполагать возрастание и массы микробной биоты в составе осадочных отложений. Соответственно можно говорить о преобладании микробиоты именно в бурых углях с новообразованными сульфидными образованиями и сульфидным цементом, точнее о её весьма значимой роли при фиксации рудных элементов. Такая приуроченность к цементирующему материалу осадочных пород урановой черневой минерализации (тесно ассоциирующей с пиритом) весьма характерна для хорошо изученных руд палеорусловых урановых месторождений (Дойникова, 2007; Дойникова и др., 2018). Помимо собственной биоты растительных остатков, почвенная микробиота переносилась фильтрующимися водами в песчаниковые толщи, обеспечивая непрерывное (сначала аэробное, а затем и анаэробное) окисление органического вещества. В окислительной среде, благодаря микробной активности, происходило поверхностное изменение зерен песков, 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 (Bonnetti et al., 2015; Дойникова, 2016). В восстановительной среде происходит сорбция урана на поверхности зерен кварца, вызывая их темную окраску. Установлено Л.Н. Беловой по данным f-радиографии (Дойникова, 2012).

При формировании песчаниковых месторождений урана классического роллового типа – **тип плато Колорадо**, были важны факторы: жаркий аридный климат и наличие широких пологих водосборных пространств типа каменистых пустынь вблизи медленно растущих горных степей (Подземное ..., 1998; Грушевой, Печенкин, 2003). Сообщалось (Wülser et al., 2011; Hall et al., 2017), что в отличие от них, для образования месторождений **палеодолинного типа** важен климат, переходный от гумидного к аридному. Такие месторождения формируются в зоне перехода от гористой, холмистой области водосбора к пологой аккумуляционной равнине прибрежно-морского (лагунного или окраинно-морского) типа (Hall et al., 2017, Hou et al., 2014). Ранее уже отмечалось, что такие палеорусловые месторождения являются полистадийными (Альтгаузен и др., 1975; Халдей и др., 1998).



**Рис. 6.4.** Схематический разрез-палеорекострукция южной части Подмосковского бурогоугольного бассейна и позиция U-Mo-Re минерализации для средневизейского (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; рис.3.2,3.3 (Гл. III).

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 авлакогена; 7 – верхнедевонские карбонатно-терригенные отложения; 8, 9 – нижнее-средневизейские отложения, (9) – с пластами растительного детрита; 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. Использованная при составлении разрезов геолого-тектоническая основа и соответствующие ссылки приведены в Главе III, см. рис. 3.2 и 3.3.

Общепризнано значение экзогенных факторов в образовании месторождений «песчаникового» промышленного типа, как основополагающих (Лисицин, 1975; Гидрогенные ..., 1980; Кисляков, Щеточкин, 2000; Кондратьева и др., 2011). Но во многих случаях предполагается важная роль эндогенных факторов, прежде всего – тектонического (Максимова, Шмариович, 1993; Грушевой, Печенкин, 2003; Калашник, 2014 и др.). Так, размещение экзогенно-инфильтрационных песчаниковых месторождений урана Ингуло-Ингулецкого, Саксаганско-Сурского и Южно-Бугского рудных районов в чехле Украинского щита связано с разломной тектоникой. Здесь гидрогенные месторождения приурочены к субширотной полосе, ортогонально пересекающей речные палеодолины, которые открываются на север, в морской бассейн Днепровско-Донецкой впадины, или на юг, в морской бассейн Тетиса. Рудные зоны в чехле контролировались зонами глубинных долгоживущих разломов преимущественно широтного простирания и формировались в значительной степени за счет разгрузки восходящего потока ураноносных растворов (Калашник, 2014). Рудоносны в основном участки развития угленосной формации среди песчаных фаций эоцена. Привнос и перераспределение урана относятся на конец плиоцена – начало четвертичного периода (Гурский и др., 2005), когда вместе с ураном шло накопление Se, Re, Y, Mo, Sr, Cr, Ni, Zn, Ti и др. Таким образом, здесь при сопоставлении с изучаемым нами объектом просматриваются многочисленные параллели.

В случае Брикетно-Желтухинского месторождения обсуждались такие же региональные рудоконтролирующие факторы, к которым отнесены как меридиональная, так и субширотные зоны разломов (Карась и др., 2017; Викентьев, Кайлачаков, 2020). Для описываемого месторождения предполагается значительный вклад эндогенных факторов в его образование. Эти факторы связаны с активизацией разломов фундамента ВЕП, начиная с этапа седиментогенеза, когда эпиплатформенный щелочно-базальтовый магматизм сначала поставлял в осадки пепловый материал (Пучков, 2010). Позднее, на эпигенетическом этапе, сказался вклад глубинных магматических (мантийной природы) флюидов, несущих U, Mo, Re, Se (Викентьев, Кайлачаков, 2020).

Мы полагаем, что периоды тектонической активизации сопредельных Уральской и Альпийской складчатых областей «оживили» структуры фундамента

ВЕР и способствовали поступлению в породы чехла глубинных эксфильтрационных вод и рассолов (источники сульфатной серы/сероводорода). Влияние этих процессов, начиная с периода раннего диагенеза, продолжалось при катагенезе. Особое значение они приобрели на эпигенетическом этапе минералообразования, когда в сферу экзогенно-эпигенетического рудоотложения вероятно поступали не только эксфильтрационные рассолы, но и глубинные мантийные (?) флюиды.

Изложенные выше результаты исследований приводят к следующим выводам:

1. Уточнена комбинированная син-эпигенетическая модель U-Mo-Re месторождения палеодолинного типа. Обломочный аркозовый и подчиненный пепловый вулканомиктовый материал, 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; обилие растительного детрита свидетельствует о преобладающем в это время гумидном климате. Теплый влажный климат способствовал развитию глубоко проникающих кор выветривания на прилегающем крупном выступе кристаллических пород Воронежской антеклизы, который сложен гранит–зеленокаменными, железисто–кремнистыми и черносланцевыми комплексами. Процессы их выветривания высвобождали 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 как в виде взвешенных (обломочных и крупных коллоидных) частиц, так и в растворенном виде, в основном, вероятно, 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 часто сорбировался на измененной поверхности пирита, реже – 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.

2. Основные промышленные U-Mo-Re руды сформировались в песчаной толще на втором, гидрогенном этапе, когда минералообразование происходило при

латеральной фильтрации обогащенных кислородом подземных вод по высокопроницаемым горизонтам. Этот процесс, скорее всего, сопровождался частичным переотложением U, Mo, Re, Se, Cu, Ni, Zn из послонной дисперсной рудной минерализации первого этапа. Рудообразование происходило на восстановительном барьере (растительный детрит и, возможно, пирит), а также на сорбционном барьере (глинистые осадки). 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 аэробного–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.

3. Условия, способствующие образованию гидрогенных U-Mo-Re месторождений в визейских палеодолинах Подмоскoвнoгo бурoугoльнoгo бассeйнa, представляются следующими. На первом этапе (поздний палеозой): гумидный климат в ранне-средневизейское время и густая сеть поверхностных водотоков с большим дебетом сформировали глубоко врезаемые 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, 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 (мезозой): господство аридного климата продолжалось в течение триаса. Длительный период (триас–ранняя юра) поднятия ВЕП

активизировал гидродинамику подземных вод. Периоды тектонической активизации сопредельных Уральской и Альпийской складчатых областей “оживили” структуры фундамента ВЕП и способствовали поступлению в породы осадочного чехла глубинных эксфильтрационных вод и рассолов (источники сульфатной серы), а также, возможно, мантийных флюидов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Брикетно-Желтухинское U–Mo–Re месторождение в Подмосковном буроугольном бассейне локализовано в аллювиальных песчаных отложениях бобриковского горизонта визейского возраста, залегающих на известняках фаменского яруса и перекрытых неоген-четвертичными песками и глинами. Основная часть месторождения расположена в толще песков русловой и пойменной фаций, а также в дельтовых фациях палеореки, впадавшей в мелководный морской залив.

2. В разрезе месторождения представлены нелитифицированные и крайне слабо литифицированные горизонты разнотернистых умеренно- и плохосортированных песков, содержащих углефицированный растительный детрит и пропластки бурых углей, накапливавшихся в аллювиальных и мелководно–морских условиях на фоне теплого влажного климата. Паралический тип углеобразования, характерный для каменноугольного периода, и накопление сероцветной толщи высокопроницаемых плохосортированных песков с фоновой пиритизацией, в дальнейшем стали основными факторами, обеспечившими промышленную рениенность Брикетно-Желтухинского месторождения.

3. Строение бобриковской свиты изменчиво по вертикали и латерали; однако для свиты в целом характерно субгоризонтальное залегание. Строение бобриковской песчаной толщи осложнено раздувами, связанными с возрастанием мощности основной рудовмещающей пачки песков. Это происходит как в результате опускания ее подошвы за счет выполнения карстовых ложбин и впадин, существовавших в кровле подстилающих ее фаменских известняков, так и в результате воздымания вышележащих песчаных слоев. Эти своеобразные “биклиальные” структуры вмещают морфологически выраженные и, одновременно, концентрационные рудные столбы, осложняющие пологозалегающую стратиформную, практически единую рудную залежь.

4. Геохимическими исследованиями руд Брикетно-Желтухинского месторождения установлены корреляционные связи основных рудных компонентов, в том числе - значимая положительная корреляция Re с Mo, U, Ag, Se, Zn, Co, Ni, Pb,

и выявлен широкий ореол рениевой минерализации, охватывающий участки распространения молибдена и урана.

5. 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. Максимальное обогащение металлами наблюдается в углистых пропластках среди песков.

6. В обогащенных рением участках экспериментально установлены формы нахождения рудных элементов: преимущественно с органическим веществом руд связаны Re (56%) и Mo (47%); значительная часть Re (30%) представлена ионообменной формой, а Mo (43%) – прочносвязанной минеральной; доминирующее количество урана (> 90%) находится в слабосвязанной подвижной форме.

7. В локализации оруденения на U-Mo-Re Брикетно-Желтухинском месторождении отмечены закономерности, характерные для пластово-инфильтрационных месторождений палеодолинного типа:

- приуроченность рудных тел к крупной палеодолине (Скопинская палеорека);
- фиксирующаяся в продольном разрезе северной части месторождения U-Mo-Re (Se) зональность роллового типа;
- более широкое, по сравнению с ураном, распространение рения в разрезах, при частом совпадении их максимальных концентраций;
- приуроченность зон окисления к наиболее проницаемым участкам пород (мелко-среднезернистые пески);
- наличие среди рудоносной толщи тонких горизонтов окисления оранжевой окраски, которые характеризуются относительной обогащённостью Se и обедненностью Re.

8. Для U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения существенно уточнен минеральный состав:

- для *урана*, кроме дисперсных оксидных фаз, установлено его присутствие в составе акцессорных минералов (циркон, ксенотим, монацит и РЗЭ-фосфат). В дополнение к ранее известным минеральным формам урана  $U^{4+}$ , проведенными исследованиями была выявлена его легкоподвижная уранильная форма за пределами рудного тела в ореоле распространения рения (богатые Re участки); здесь

же установлена минеральная ассоциация, сопутствующая повышенным содержаниям урана (пирит – микроклин – смешанослойный иллит-сметтит – гипс);

- для **молибдена** установлены его сульфидные формы, всегда содержащие Re и Fe: кристаллическая – Re-содержащий молибденит и его аморфная разновидность – иордизит; в их составе часто – примеси Se, As, Zn, Co, Ni. В богатой Re руде только около половины содержащегося молибдена находится в минеральной форме (Re-молибденит); остальная его часть представлена преимущественно в органическом веществе; слабосвязанную здесь форму Mo (n%) мы соотносим с плохо окристаллизованным веществом дисперсных Mo-сульфидных образований;

- в составе минеральных фаз **рений** зафиксирован в молибдените (~1.28% Re) и в иордизитовой массе (~1.5% Re). Основная часть Re связана с органическим веществом углистой массы. Установлена тенденция накопления Re (от 6.3 до 30.0 г/т) в ряду от глинистого и сульфидного цемента до ультратонкой угольной фракции. Это рассматривается нами как действие сорбционного барьера, концентрирующего Re в глинистом и углистом веществе (ионообменная форма);

- минеральные формы **селена** в рудах представлены Se-пиритом, клаусталитом (PbSe) и селенидом железа джаркенитом (FeSe<sub>2</sub>), ранее не известным на данном месторождении.

9. Предложена комбинированная син-эпигенетическая модель рудонакопления при образовании гидрогенного U–Mo–Re месторождения палеодолинного типа. Модель включает как процессы осадконакопления и последующего диагенеза, происшедшие с образованием субпромышленных послонных скоплений U ( $\pm$ Mo, Re), приуроченных к углистым и глинистым горизонтам, так и более поздние эпигенетические процессы минералообразования. Эти гидрогенные процессы связаны с латеральной миграцией кислородсодержащих подземных вод, переотложением урана и других металлов, образованием рудных залежей в результате действия геохимических (сорбционный и восстановительный барьеры) и гидродинамических (вариации проницаемости песков фациально изменчивой толщи) факторов.

10. Для образования U–Mo–Re скоплений в осадочных породах чехла Русской плиты важнейшими факторами являются тектонический и магматический, которые вызывали ее активизацию, прежде всего – позднедевонский щелочно-базальтовый

вулканизм Восточно-Европейской Крупной Магматической Провинции. Неоднократные импульсы тектогенеза обусловили подновление существующих в фундаменте разломов, обеспечив, таким образом, дренаж более глубоких частей коры (и мантии?), поступление в стратисферу глубинных флюидов. Важными элементами модели стадии эпигенеза являются восстановительные барьеры; возникающие при встрече латерально мигрирующих подземных вод с поступающими вверх по разломам потоками вод глубинной циркуляции, которые нарушают фаменские известняки подошвы песчаной толщи.

11. Руды Брикетно-Желтухинского U–Mo–Re месторождения в Подмосковном буроугольном бассейне представлены преобладающей обломочной минеральной фракцией (преобладает средне-крупнообломочная песчаная размерность) и не сцементированным межзерновым матриксом, который представлен глинистыми частицами (каолинит, смешанослойные иллит-сметиты и др.), тонкодисперсным углистым материалом, реже – доломитовым и сульфидным (пирит/марказит) цементом.

12. Преобладающая часть рудных компонентов (U, Mo, Re) представлена сорбированными формами, как правило, в составе измененной поверхности различных частиц: уран – в составе углистых, глинистых и сильно измененных сульфидных частиц; молибден и рений – в измененной (аморфизированной) поверхности пирита, рений – в Fe-молибдените, иордизите.

13. Рудная минерализация Брикетно-Желтухинского месторождения резко отличается от характерной для известных палеодолинных месторождений урана базального типа – фосфатной черневой минерализации. Мы связываем это с различным составом подстилающих толщ, слагающих ложе врезанных русел. Песчаниковые месторождения урана, врезанные в гранитоидный фундамент, сложены преимущественно нингиоитом (с незначительным проявлением коффинита и настурана). Базальная толща вреза исследованного нами месторождения – карбонатная (известняки и доломиты), что, вероятно, и определяет минералогическую специфику руд. Карбонатный материал подстилающей толщи способствует активному развитию микробиоты (служит питанием автотрофных организмов аэробно–анаэробного бактериального сообщества). Предполагается также значительный вклад в образование руд эндогенных факторов, связанных с активизацией разломов фундамента ВЕП, эпиплатформенным щелочно–

базальтовым магматизмом, поступлением в сферу рудоотложения не только эксфильтрационных рассолов, но и глубинных флюидов, несущих U, Mo, Re, Se.

14. Рассмотрен механизм U-Mo-Re-(Se) рудообразования при формировании этого месторождения палеодолинного типа. На первом этапе, 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 на следующем этапе, гидрогенном, когда минералообразование происходило при латеральной фильтрации обогащенных кислородом подземных вод по проницаемым горизонтам песков. Этот процесс, скорее всего, сопровождался частичным переотложением U, Mo, Re, Se, Cu, Ni, Zn из послойной дисперсной рудной минерализации первого этапа. Рудообразование происходило на восстановительном барьере (растительный детрит, пирит?), а также на сорбционном барьере (глинистые осадки). При этом U, Mo и Re фиксировались как в минеральной, так и, преимущественно, в сорбированной формах.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ****Опубликованная**

- 1) *Альтгаузен М.Н., Халезов А.Б., Малышев В.И., Ковалева С.А.* Многостадийное образование экзогенных концентраций урана в палеоруслах // Геология рудных месторождений. 1975. Т. XVII. № 1. С. 105–108.
- 2) *Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В. и др.* Низкофоновый гамма-спектрометр с защитой на антисовпадениях от космического излучения // Ядерная физика и инжиниринг, 2013. Т.4. № 9-10. С. 879.
- 3) *Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В. и др.* Возможности определения микропримесей в материалах на измерительно-активационном комплексе на базе фотонейтронного источника // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 6. С. 824-827.
- 4) *Андрющенко Н.Д., Сафонов А.В., Бабич Т.Л. и др.* Сорбционные характеристики материалов фильтрационного барьера в верхних водоносных горизонтах, загрязненных радионуклидами // Радиохимия. 2017. Т. 59(4). С. 361–370.
- 5) *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.
- 6) *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. DOI: 10.31857/S0367676521100045.
- 7) *Басков Е.А., Высоцкий В.А., Грушевой Г.В. и др.* Ураноносность плитных комплексов Русской платформы // Мат. по геол. месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. Вып.136. М.: ВИМС, 1993. С. 5–17.
- 8) *Бибикова Е.В., Богданова С.В., Постников А.В. и др.* Зона сочленения Сарматии и Волго–Уралии: изотопно–геохронологическая характеристика супракrustальных пород и гранитоидов // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2009. Т. 17. № 6. С. 3–16.

- 9) *Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др.* Минеральный ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 97–119.
- 10) *Бурденкова Н.Н.* Рений. Тенденции в развитии мирового рынка. М.: ИМГРЭ, 2002. 95 с.
- 11) *Викентьев И.В., Кайлачаков П.Э.* Уникальное месторождение рения в угленосных песках карбона русской плиты. Сообщение 1. Геологическое строение // Литология и полез. ископаемые. 2020. № 3. С. 209–226. DOI: 10.31857/S0024497X20030064.
- 12) *Викентьев И.В., Белогуб Е.В., Молошаг В.П., Еремин Н.И.* Селен в колчеданных рудах // Доклады РАН. 2019. Т. 484. № 3. С. 67–70.
- 13) Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200 000. Серия Московская. Лист N-37-XXII. Объяснительная записка / Составитель Ф.И. Урусбиева. М.: Недра, 1968.
- 14) Гидрогенные месторождения урана. Основы теории образования / Ред. А.И. Перельман. М.: Атомиздат, 1980. 270 с.
- 15) Государственная геологическая карта масштаба 1:200 000, серия Московская, Лист N-37-XXII, М, 1968.
- 16) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000 000. Серия Центрально–Европейская Лист N-37 – Москва. Объяснительная записка / Составитель В.П. Кириков. СПб.: ВСЕГЕИ, 2015.
- 17) *Грабежев А. И.* Рений в медно-порфировых месторождениях Урала // Геология рудных месторождений. – 2013. – Т. 55. – № 1. – С. 16–32.
- 18) *Грушевой Г.В., Оношко И.С., Наумов С.С.* Прогнозная оценка ураноносности чехла Русской платформы // Разведка и охрана недр. 1996. № 3. С. 11–20.
- 19) *Грушевой Г.В., Радюкевич Н.М., Иванова Т.А.* Критерии прогнозирования уранового оруденения в чехле Русской платформы // Региональная геология и металлогения. 1999. № 8. С. 12–22.
- 20) *Грушевой Г.В., Печенкин И.Г.* Металлогения ураноносных осадочных бассейнов Центральной Азии. Москва: ВИМС, 2003. 102 с.

- 21) *Гурский, Д.С., Есинчук К.Е., Калинин В.И.* и др. Металлические и неметаллические полезные ископаемые Украины. Т. 1. Металлические полезные ископаемые. Киев, Львов: Центр Европы, 2005. 785 с.
- 22) *Дойникова О.А., Белова Л.Н., Горшков А.И., Сивцов А.В.* Урановая чернь: вопросы генезиса и минерального состава // Геология рудных месторождений, 2003. Т. 45. № 6. С. 514-530.
- 23) *Дойникова О.А.* Месторождения урана с новым типом черневой минерализации: фосфатным // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 1. С. 60–78.
- 24) *Дойникова О.А.* Минералогия урана восстановительной зоны гипергенеза (по данным электронной микроскопии) // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 216 с.
- 25) *Дойникова О.А.* Фосфатный состав урановых черней как показатель их биогенного генезиса // Изв. вузов. Геология и разведка. 2016. № 5. С. 18–25.
- 26) *Дойникова О.А.* Биогенный аспект образования урановых черней (проявление закона имени В.И.Вернадского) // Геохимия ландшафтов. К 100-летию А.И. Перельмана. М.: АПР, 2017. С. 524-530.
- 27) *Дойникова О.А., Тарасов Н.Н., Карташов П.М.* Урановая минерализация палеодолинных месторождений Витима, Россия // Разведка и охрана недр. 2018. № 12. С. 24–30.
- 28) *Дойникова О.А., Тарасов Н.Н., Петров В.А., Карташов П.М.* Черневые фосфатные урановые руды Витимского плато (Бурятия) // Радиохимия. 2020. Т. 62. № 4. С. 349–358.
- 29) *Донец А.И., Конкин В.Д.* Минералого-геохимические типы и региональные геологические особенности стратиформных свинцово-цинковых месторождений в карбонатных толщах // Отечественная геология. 2017. № 6. С. 31–39.
- 30) *Егоров А.С.* Глубинное строение и геодинамика литосферы Северной Евразии (по результатам геолого–геофизического моделирования вдоль геотраверсов России). СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. 200 с.
- 31) *Енгальчев С.Ю.* Новые данные о минеральном составе уникальных ренийевых U–Mo–Re-руд Брикетно-Желтухинского месторождения Подмосковского

бассейна // Доклады РАН. 2019. Т. 485. № 4. С. 464–467. DOI 10.31857/S0869-56524854464-467.

32) *Енгальчев С. Ю., Пуговкин А. А., Лебедева Г. Б.* Геолого-структурные критерии локализации уран-молибден-рениевого оруденения в восточной части Подмосковского бассейна // Регион. геология и металлогения. 2015. № 62. С. 97–104.

33) *Енгальчев С.Ю.* Рениеносность осадочного чехла Восточно-Европейской платформы // СПб.: Труды ВСЕГЕИ, 2019. Т. 359. 288 с.

34) *Знаменский В. С.* Рениит  $\text{ReS}_2$  – природный дисульфид рения из фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) В. С. Знаменский, М. А. Коржинский, Г. С. Штейнберг, С. И. Ткаченко, А. И. Якушев, И. П. Лапутина, И. А. Брызгалов, Н. Д. Самоин, Л. О. Магазина, О. В. Кузьмина, Н. И. Органова, В. А. Рассулов, И. В. Чаплыгин // Записки Российского минералогического общества. 2005. Т. 84, № 5. С. 32–40.

35) *Зыков Д.С., Полещук А.В.* Признаки горизонтальных движений Воронежского выступа кристаллического фундамента на неотектоническом этапе // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2015. Т. 90. Вып. 2. С. 3–13.

36) *Иванов В.В., Поплавко Е.М., Горохова В.Н.* Геохимия рения. М.: Наука, 1969. 160 с.

37) *Иванова Т.А., Грушевой Г.В.* Некоторые геоморфологические особенности размещения урановых месторождений на Русской и Скифской плитах // Разведка и охрана недр. 2009. № 3. С. 19–24.

38) *Кайлачаков П.Э.* Особенности геологического строения редкометального Брикетно-Желтухинского месторождения // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты // Сборник материалов XXIX Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 7 октября – 1 ноября 2016 г. / Под ред. С.С. Чернова. Новосибирск: ООО Центр развития научного сотрудничества, 2016. № 29. С. 24-29.

39) *Кайлачаков П.Э.* Сульфидная минерализация руд уран–молибден–рениевого Брикетно–Желтухинского месторождения (Подмосковный бассейн) // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2017. № 3. С. 353–360. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-353-360.

40) *Кайлачаков П.Э.* Геологическое строение и минеральный состав руд Брикетно-Желтухинского месторождения рения // VII научно-практическая школа-конференция молодых ученых и специалистов с международным участием «Геология, поиски и комплексная оценка месторождений твердых полезных ископаемых». М.: ВИМС, 2017. С. 48-49.

41) *Кайлачаков П.Э.* Геохимическая зональность уран-молибден-ренийевого Брикетно-Желтухинского месторождения (Подмосковный бассейн) // VII Российская молодежная научно-практическая Школа: «Новое в познании процессов рудообразования» 13 - 17 ноября 2017 г. М.: ИГЕМ РАН, 2017. С. 149-150.

42) *Кайлачаков П.Э.* Геолого-структурные условия локализации U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения (Подмосковный бассейн) // Всероссийская конференция, посвященная 120-летию со дня рождения выдающегося российского ученого академика А.Г. Бетехтина «Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: новые горизонты». Москва, 20-22 ноября 2017 г. С. 426-429.

43) *Кайлачаков П.Э.* Особенности сульфидной минерализации и условия рудообразования на Брикетно-Желтухинском месторождении (Подмосковный бассейн) // VII Всероссийская студенческая научно-практическая конференция с международным участием «От учебного задания – к научному поиску, от реферата – к открытию». ХГУ им. Н.Ф. Катанова, г. Абакан, 2018. С. 246-248.

44) *Кайлачаков П.Э.* Характеристика продуктивной (U-Mo-Re) части разреза бобриковского горизонта Подмосковного бурогоугольного бассейна // IX Российская молодежная научно-практическая Школа с международным участием: «Новое в познании процессов рудообразования» 25 - 29 ноября 2019 г. М.: ИГЕМ РАН, 2019. С. 170-173.

45) *Кайлачаков П.Э., Дойникова О.А., Белоусов П.Э., Викентьев И.В.* Уникальное месторождение рения в угленосных песках карбона русской плиты. Сообщение 2. Минералогия руд // Литология и полез. ископаемые. 2020. № 4. С. 337–370. DOI: 10.31857/S0024497X20040023.

46) *Кайлачаков П.Э.* Новые данные по минералогии руд U-Mo-Re Брикетно-Желтухинского месторождения (Подмосковный бассейн) // X Российская молодежная научно-практическая Школа с международным участием: «Новое в

познании процессов рудообразования» 29 ноября - 3 декабря 2021 г. М.: ИГЕМ РАН, 2021. С. 124-126.

47) *Калашиник А.А.* Новые подходы к прогнозированию промышленных экзогенно-инфильтрационных месторождений урана в осадочном чехле Украинского щита // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2014. № 454. С. 53–59.

48) *Карась С.А., Кременецкий А.А., Орлов С.Ю., Культин Ю.В., Шлычкова Т.Б.* Новый геолого-промышленный тип гидрогенных месторождений рения // Разведка и охрана недр. 2017. № 8. С. 20–27.

49) *Карась С.А., Культин Ю.В., Кременецкий А.А., Орлов С.Ю., Шлычкова Т.Б., Кайлачаков П.Э.* Новый геолого-промышленный тип гидрогенных рениевых месторождений: геологическое строение и технология подземного выщелачивания // Рений, вольфрам, молибден – 2016. Научные исследования, технологические разработки, промышленное применение // Сборник материалов международной научно-практической конференции, Москва, 24–25 марта 2016 г. М.: Институт Гинцветмет, 2016. С. 78–82.

50) Карта новейшей тектоники Северной Евразии. Масштаб 1: 5000000 / Ред. А.Ф. Грачев. М.: МПР РФ, РАН, 1997.

51) *Каширцева М.Ф.* Методы изучения эпигенетических изменений в рыхлых осадочных породах. М.: Недра, 1970. 152 с.

52) *Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н.* Гидрогенное рудообразование. М.: Геоинформмарк, 2000. 608 с.

53) *Кондратьева И.А., Печенкин И.Г., Гаврюшов А.В.* Условия формирования инфильтрационных месторождений урана и гидрогеохимические методы их изучения. М.: ВИМС, 2011. 77 с.

54) *Кочкин Б.Т., Новгородцев А.А., Тарасов Н.Н., Мартыненко В.Г.* Морфологические особенности рудных тел и генезис месторождений урана Хиагдинского рудного поля // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56. № 6. С. 539–555.

55) *Кочкин Б.Т.* Восстановительные новообразования на экзогенных инфильтрационных месторождениях урана и их связь с восходящими подземными водами // Геология рудных месторождений, 2020. Т. 62. № 1. С. 23 – 35. DOI: 10.31857/S0016777020010049.

- 56) *Копп М.Л.* Мобилистическая неотектоника платформ Юго–Восточной Европы // Тр. ГИН РАН. Вып. 552. М.: Наука, 2004. 340 с.
- 57) *Копп М.Л., Корчемагин В.А., Колесниченко А.А.* Альпийские деформации Донбасса: периодичность, характер напряжений и их вероятные источники // Геотектоника. 2010. № 5. С. 41–60.
- 58) *Кременецкий А. А., Белоконова О.* Завод на вулкане // М: Наука и жизнь, 2000. № 11. С. 26 – 30.
- 59) *Кременецкий А.А., Лунева Н.В., Куликова И.М.* Бельское Re–Mo–U месторождение: минералого–геохимические особенности, условия формирования, технология извлечения рения // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 33–40.
- 60) *Культин Ю.В., Новгородцев А.А., Фоменко А.Е. и др.* Оценка возможности разработки комплексного уран–молибден–рениевого месторождения способом подземного выщелачивания // Горный журнал. 2007. № 6. С. 47–51.
- 61) *Лаверов Н.П., Величкин В.И., Шумилин М.В.* Урановые месторождения стран Содружества: основные промышленно-генетические типы и их размещение // Геология рудных месторождений. 1992. № 2. С. 3–18.
- 62) *Лаверов Н.П., Лисицин А.К., Солодов И.Н.* Урансодержащие полиэлементные экзогенные эпигенетические месторождения: условия образования и источники металлов, извлекаемых методами подземного выщелачивания // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42. №1. С. 5–24.
- 63) *Лаверов Н.П., Величкин В.И., Власов Б.П. и др.* Урановые и молибден-урановые месторождения в областях развития континентального внутрикорового магматизма: геология, геодинамические и физико-химические условия формирования. М.: ИФЗ РАН, ИГЕМ РАН, 2012. 320 с.
- 64) *Левченко Е.Н., Быховский Л.З., Спиридонов И.Г., Ключарев Д.С.* Особенности учета запасов редких металлов // Разведка и охрана недр. 2019. № 1. С. 45–51.
- 65) *Лисицин А.К.* Гидрогеохимия рудообразования (на примере экзогенных эпигенетических урановых руд). М.: Недра, 1975. 248 с.
- 66) *Максимова М.Ф., Шмариович Б.М.* Пластово-инфильтрационное рудообразование. М.: Недра, 1993. 160 с.

- 67) *Махлина М.Х., Вдовенко М.В., Алексеев А.С. и др.* Нижний карбон Московской синеклизы и Воронежской антеклизы. М.: Наука, 1993. 221 с.
- 68) *Машковцев Г.А., Мизута А.К., Тарханов А.В., Щеточкин В.Н.* Урановорудный потенциал России 2015–2035 // Минеральное сырье. Вып. № 33. М.: ВИМС, 2017. 119 с.
- 69) *Мелентьев Г.Б.* Ресурсно-технологические проблемы воссоздания и развития Российских производств лития и особо ценных рассеянных редких металлов: состояние и приоритеты реализации // Научно-практическая конференция с международным участием «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований» Екатеринбург: УрО РАН, 2020. С. 36-49.
- 70) Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Радиоактивные металлы. М.: ГКЗ МПР России, 2007.
- 71) *Милановский Е.Е.* Геология России и ближнего зарубежья (Северной Евразии). М.: Изд-во МГУ, 1996. 448 с.
- 72) *Новиков Г.В., Яшина С.В., Мельников М.Е. и др.* Природа кобальтоносных железомарганцевых корок Магеллановых гор Тихого океана. Сообщение 2. Ионобменные свойства рудных минералов // Литология и полез. ископаемые. 2014. № 2. С. 137–164. DOI: 10.7868/S0024497X14020074.
- 73) *Павлова Л.С., Тимофеев А.А.* Подмосковский буроголовый бассейн // Угольная база России. Т. 1. М.: Недра, 2000. С. 107–130.
- 74) Палеогеоморфологический атлас СССР. Карты палеорельефа и коррелятных отложений / Ред. А.В. Сидоренко. Л.: ВСЕГЕИ, 1983.
- 75) Подземное выщелачивание полиэлементных руд / Ред. Н.П. Лаверов. М.: Изд-во Академии Горных наук, 1998. 448 с.
- 76) *Перельман А.И.* Геохимия ландшафта // М.: Высшая школа, 1975. 342 с.
- 77) *Перельман А. И.* Гидрогенные месторождения урана. // М.: Атомиздат, 1980. 270 с.
- 78) *Перельман А. И.* Геохимия // М.: Высшая школа, 1989. 598 с.
- 79) *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1999. 610 с.

- 80) *Петров В.Г.* Особенности строения Калужской структуры // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1969. Т. 44. Вып. 6. С. 36–42.
- 81) *Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- 82) *Пучков В.Н.* Дайковые рои Урала и ассоциирующие с ними магматические комплексы // М.: Геотектоника, 2012. №1. С. 42-52.
- 83) *Расулова С. Д., Тарханова Г.А., Авакумов В.В.* Седиментационно-диагенетические накопления урана в осадочных отложениях урановорудных объектов спорного генезиса // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов / Сборник КНТС. Вып. 151. М.: ВИМС, 2007. С. 68-82.
- 84) *Стиридонов И.Г., Килипко В.А., Левченко Е.Н., Ключарев Д.С.* Основные задачи геохимического картирования и поиски новых источников нетрадиционного редкометалльного сырья // Разведка и охрана недр. 2016. № 9. С. 115–122.
- 85) Тектоническая карта центральных районов Восточно–Европейской платформы масштаба 1:1000000 / Составители Ю.Т. Кузьменко, В.Н. Гордасников, Е.А. Гаврюшова и др. М.: Недра, 1988.
- 86) *Терехов Е.Н., Балуев А.С., Пржиялговский Е.С.* Структурное положение и геохимические особенности девонского дайкового магматизма Кольского полуострова // М.: Геотектоника, 2012. №1. С. 77-94.
- 87) *Трач Г.Н., Бескин С.М.* Ресурсный потенциал рения территории России // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 26–32.
- 88) *Трегуб А.И.* Неотектоника территории Воронежского кристаллического массива // Тр. Научно-исслед. института ВГУ. Вып. 9. Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 2002. 220 с.
- 89) *Фоменко А.Е., Сазонов В.П., Дмитраков Л.И.* Особенности размещения уранового оруденения Подмосковной ураноносной области // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. Вып. 140. М.: ВИМС, 1999. С. 5-14.
- 90) *Халдей А.Е., Расулова С.Д., Коченов А.В.* Историко-геологические предпосылки образования ураноносных палеодолин // Отечественная геология. 1998. № 5. С. 28–31.

- 91) *Халезов А.Б.* Далматовское месторождение урана. М.: ВИМС, 2003. 129 с.
- 92) *Халезов А.Б., Долбилин С.И., Марков С.Н. и др.* Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона. М.: ВИМС, 2009. 145 с.
- 93) *Халезов А.Б.* К вопросу о расширении минерально–сырьевой базы рения в российской федерации // Разведка и охрана недр. 2009. № 8. С. 13–17.
- 94) *Чамов Н.П.* Локальная тектоника и седиментация в грабенах Среднерусского авлакогена (Восточно–Европейская платформа) // Литология и полез. ископаемые. 2015. № 6. С. 549–562.
- 95) *Чамов Н.П.* Тектоническая история и новая модель формирования Среднерусского авлакогена // Геотектоника. 2005. № 3. С. 3–22.
- 96) *Чамов Н.П., Горбачев В.И.* Строение и состав пород Бельского поднятия Подмосковского авлакогена // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2004. Т. 79. Вып. 4. С. 3–10.
- 97) *Швецов М.С.* Геологическая история средней части Русской платформы в течение нижнекаменноугольной и первой половины среднекаменноугольной эпох. М.: ВНИГРИ, 1954. 79 с.
- 98) *Шмариович Е.М., Натальченко Б.И., Бровин К.Г.* Условия формирования комплексного пластово-инфильтрационного оруденения // Сов. геология. 1987. № 8. С. 24–31.
- 99) *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: УИФ: Наука, 1994. 304 с.
- 100) *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар, Геопринт, 2011. 742 с.
- 101) *Belousov P., Semenkova A., Egorova T. et al.* Cesium sorption and desorption on glauconite, bentonite, zeolite, and diatomite // Minerals. 2019. V. 9, 625. P. 1-17 <https://doi.org/10.3390/min9100625>.
- 102) *Bogdanova S.V., Bingen B., Gorbatshev R. et al.* The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia // Precambrian Res. 2008. V. 160. P. 23–45.
- 103) *Bonnetti C., Cuney M., Michels R. et al.* The multiple roles of sulfate-reducing bacteria and Fe-Ti Oxides in the genesis of the Bayinwula roll front-type uranium

deposit, Erlian basin, NE China // *Econ. Geol.* 2015. V. 110. P. 1059–1081.

104) *Cai C., Li H., Qi, M., et al.* Biogenic and petroleum-related ore-forming processes in Dongsheng uranium deposit, NW China // *Ore Geol. Rev.* 2007. V.32. P. 262–274.

105) *Davies G.R., Smith L.B.* Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview // *AAPG Bull.* 2006. V. 90(11). P. 1641–1690.

106) *Ernst R.E., Bell K.* Large Igneous Provinces (LIPs) and carbonatites // *Miner. Petrol.* 2010. V. 98. P. 55–76.

107) *Garrels R.M., Christ C.L.* *Solutions, Minerals and Equilibria.* N. Y.: Harper & Row, 1965. 450 p.

108) *Hall S.M., Mihalasky M.J., Tureck K., Hammarstrom J.M., Hannon M.* Genetic and grade and tonnage models for sandstone-hosted roll-type uranium deposits, Texas Coastal Plain, USA // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 80. P. 716–753.

109) *Hou B., Michaelsen B.H., Li Z. et al.* Paleovalley-related uranium: exploration criteria and case-studies from Australia and China // *Episodes.* 2014. V. 37(3). P. 150–171.

110) *Hough G., Swapp S., Frost C., Fayek M.* Sulfur isotopes in biogenically and abiogenically derived uranium roll-front deposits // *Econ. Geol.* 2019. V. 114(2). P. 353–373.

111) *Hutchinson R.W.* Regional metallogeny of carbonate hosted ores by comparison of field relations // *SEG Spec. Publ.* 1996. V. 4. P. 8–17.

112) In situ leach mining of uranium. World Nuclear Association, 2017. WNA website. <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/in-situ-leach-mining-of-uranium.aspx>

113) *Kuznetsov N.B., Natapov L.M., Belousova E.A. et al.* Geochronological, geochemical and isotopic study of detrital zircon suites from late Neoproterozoic clastic strata along the NE margin of the East European Craton: Implications for plate tectonic models // *Gondwana Res.* 2010. V. 17. № 2–3. P. 583–601.

114) *Meunier J.D., Sellier E. and Pagel M.* Radiation-damage rims in quartz from uranium-bearing sandstones // *Journal of Sedimentary Petrology,* 1990. V. 60(1). P. 53–58.

- 115) *Min M, Xu H, Chen J, Fayek M.* Evidence of uranium biomineralization in sandstone-hosted roll-front uranium deposits, northwestern China // *Ore Geology Reviews*. 2005. V. 26. P. 198–206.
- 116) *Mohan M.S., Ilger J.D., and Zingaro R. A.* Speciation of uranium in a South Texas lignite: additional evidence for a mixed role of evidence // *Energy & Fuels*, 1991. V. 5(4). P. 568-573.
- 117) *Moore D.M.; Reynolds R.C., Jr.* X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals / 2nd ed. Oxford, UK, N. Y., USA: Oxford University Press, 1999. 378 p.
- 118) *Nikishin A.M., Ziegler P.A., Abbott D. et al.* Permo–Triassic intraplate magmatism and rifting in Eurasia: Implications for mantle plumes and mantle dynamics // *Tectonophysics*. 2002. V. 351. № 1–2. P. 3–39.
- 119) *Nikishin, A.M., Ziegler, P.A., Stephenson, R.A., Cloetingh S.A., Furne A.V., Fokin P.A., Ershov A.V., Bolotov S.N., Korotaev M.V., Alekseev A.S., Gorbachev V.I., Shipilov E.V., Lankreijer A., Bembinova E.Yu. & Shalimov I.V.* Late Precambrian to Triassic history of the East European Craton: dynamics of sedimentary basin evolution // *Tectonophysics*, 1996. V. 268. P. 23–63.
- 120) *Novikov G.V., Yashina S.V., Mel'nikov M.E., Vikent'ev I.V., Bogdanova O.Yu.* Nature of Co-bearing ferromanganese crusts of the Magellan Seamounts (Pacific Ocean): Communication 2. Ion exchange properties of ore minerals // *Lithology and Mineral Resources*. 2014. V. 49. Is. 2. P. 138–164. DOI: 10.7868/S0024497X14020074.
- 121) *Plotinskaya O.Y., Abramova V.D., Groznova E.O., Tessalina S.G., Seltmann R., Spratt J.* Trace-element geochemistry of molybdenite from porphyry Cu deposits of the Birgilda-Tomino ore cluster (South Urals, Russia) // *Mineralogical Magazine*, 2018. V. 82 (S1). P. S281–S306.
- 122) *Pownceby M.I., Johnson C.* Geometallurgy of Australian uranium deposits // *Ore Geology Reviews*, 2014. V.56. P. 25–44.
- 123) *Puchkov V.* Paleozoic evolution of the East European continental margin involved into the Urals // *Mountain Building in the Uralides: Pangea to the Present* / Eds D. Brown, C. Juhlin, V. Puchkov. AGU Geophysical Monograph Series. 2002. V. 132. P. 9–32.

124) *Puchkov, V.N.* General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: what, where, when and why // *Ore Geology Reviews*, 2017. V. 85. P. 4-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.01.005>.

125) *Puchkov V., Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Sergeeva N.* A Devonian >2000-km-long dolerite dyke swarm-belt and associated basalts along the Urals-*Novozemelian* fold-belt: part of an East-European (Baltica) LIP tracing the Tuzo Superswell // *GFF*. 2016. V. 138. Is. 1. DOI: 10.1080/11035897.2015.1118406.

126) *Reynolds R.L., Goldhaber M.B.* Iron disulfide minerals and the genesis of roll-type uranium deposits // *Econ. Geol.* 1983. V. 78. P. 105–120.

127) *Saunders J.A., Pivetz B.E., Voorhies N., Wilkin R.T.* Potential aquifer vulnerability in regions downgradient from uranium *in situ* recovery (ISR) sites // *J. Environ. Manage.* 2016. V. 183. P. 67–83.

128) *Stephenson R.A., Yegorova T., Brunet M-F., Stovba S., Wilson M., Starostenko V., Saintot A. & Kuszniir N.* Late Palaeozoic intra- and pericratonic basins on the East European Craton and its margins. In D.G. Gee & R.A. Stephenson (eds.) // *European lithosphere dynamics*, Geological Society, London, *Memoirs*. 2006. V. 32. P. 463–479.

129) *Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M.* Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // *Anal. Chem.* 1979. V. 51. P. 844–851.

130) *Vikentyev I.V., Novikov G.V., Bogdanova O.Yu.* Sorption of heavy metal cations by low-temperature deposits of Pacific hydrothermal fields // “Digging Deeper”. Proc. of the 9 th Biennial SGA meeting. Dublin, 2007 / Ed. C.J. Andrewetal. Dublin, Ireland, 2007. P. 797–800.

131) *Vikent'ev I.V., Belogub E.V., Moloshag V.P., Eremin N.I.* Selenium in massive sulfide ores // *Doklady Earth Sciences*. 2019. V. 484. Pt. 1. P. 40–44.

132) *Wallace M.W., Both R.A., Ruano M.S. et al.* Zebra textures from carbonate-hosted sulfide deposit: sheet cavity networks produced by fracture and solution enlargement // *Econ. Geol.* 1994. V. 89. P. 1183–1191

133) *Wülser P.-A., Brugger J., Foden J., Pfeifer H.-R.* The sandstone-hosted Beverley uranium deposit, Lake Frome Basin, South Australia: mineralogy, geochemistry, and a time-constrained model for its genesis // *Econ. Geol.* 2011. V. 106. P. 835–867.

134) *Wilson M.J.* Rock-forming minerals. Sheet silicates: clay minerals. Volume 3C. The Geological Society, London, 2013. 736 p.

135) *Xiong Y.* Predicted equilibrium constants for solid and aqueous selenium species to 300°C: applications to selenium-rich mineral deposits // *Ore Geol. Rev.* 2003. V. 23. P. 259–276.

136) *Zhao L., Cai C., Jin R., et al.* Mineralogical and geochemical evidence for biogenic and petroleum-related uranium mineralization in the Qianjiadian deposit, NE China // *Ore Geol. Rev.* 2018. V. 101. P. 273-292. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.07.025.

137) *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.

#### Фондовая

138) *Булахов И.А.* Отчет о поисковой разведке по Брикетно-Желтухинскому участку Скопинского и Желтухинского районов Рязанской области, 1952. № отчета РГФ158060, ТГФ-14373.

139) *Ергаков А.П., Балахнов В.Г., Соколов В.В., Абадов Б.А.* «Геолого-технический отчет по структурно-картировочной скв. 1078000, пробуренной у г. Горлово Рязанской области», 1962 Фонды ГУЦР, № 26047.

140) *Карась С.А., Орлов С.Ю., Татарников А.В., Кременецкий ... Кайлачаков П.Э. и др.* «Оценочные работы на рений и попутные компоненты на Брикетно-Желтухинском месторождении с апробацией технологии подземного выщелачивания» М.: ИМГРЭ, 2015. 2 тома, 4 книги. 994 с.

141) *Ковалев В.М. и др.* Отчет Скопинского отряда о гидрогеологической и инженерно-геологической съемке масштаба 1:200 000 и геологическом доизучении, проведенных на территории листа N-37-XXII (Скопин) в 1973-76 гг. М., 1976 г. № отчета РГФ-354271, ТГФ-32761.

142) *Новгородцев А.А., Алтунин О.В. и др.* «Оценка перспектив выявления промышленных месторождений урана в палеодолинах визейского возраста на Скопинской площади на основе составления комплекта геолого-прогнозных карт

масштаба 1:200 000 на листы N-37-XV, XVI, XXII (15 тыс. кв. км) и 1:50 000 (750 кв. км)», 2005, № отчета РГФ 16880, ТГФ-42920

143) *Овчинников В.В., Зайцев А.П., Милеева И.М., и др.* Районирование Русской плиты по степени перспективности на рудные полезные ископаемые и разработка методики региональных геохимических работ на полезные ископаемые в осадочном чехле Русской платформы. 2001г. № отчета РГФ 476938, ТГФ – 41514.

144) *Олейник О.А., Сергеев И.П. и др.* Отчет Карбоновой партии N 30 за 1956 год. Скопин, 1956 г. ЦГЭ-657.

145) *Урусбиева Ф.И. и др.* Объяснительная записка к геологической карте СССР м-ба 1:200 000, Лист N-37-XXII, Московская Серия, М., 1963 г. № отчета ТГФ 28500.