

УДК 553.493.58:553.495

## УНИКАЛЬНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ РЕНИЯ В УГЛЕНОСНЫХ ПЕСКАХ КАРБОНА РУССКОЙ ПЛИТЫ. СООБЩЕНИЕ 1. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

© 2020 г. И. В. Викентьев<sup>a, b, \*</sup>, П. Э. Кайлачаков<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

<sup>b</sup>Инженерная академия, Российский Университет Дружбы Народов,  
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия

\*e-mail: viken@igem.ru

Поступила в редакцию 30.10.2019 г.

После доработки 30.10.2019 г.

Принята к публикации 30.10.2019 г.

Брикетно-Желтухинское U–Mo–Re месторождение в южной части Подмосковного бурогоугольного бассейна (центральная часть Восточно-Европейской платформы) локализовано в палеоусловных и дельтовых угленосных песчаных отложениях бобриковского горизонта визейского возраста, залегающих на известняках фаменского яруса и перекрытых более молодыми неоген-четвертичными песками и глинами. В тектоническом плане позиция месторождения отвечает южному плечу Пачелмского авлакогена, рассеченному меридиональной разломной зоной. Присутствие мощной сероцветной толщи разнозернистых умеренно- и плохосортированных песков, содержащих углефицированный растительный детрит, является одним из главных литолого-фациальных факторов локализации U–Mo–Re оруденения. Существенно песчаная бобриковская свита накопилась в речной, заболоченной, дельтовой и мелководно-лагунной обстановках на фоне теплого влажного климата. Предложена комбинированная син-эпигенетическая модель образования U–Mo–Re месторождения палеодолинного типа. Субпромышленные послонные скопления U ( $\pm$ Mo, Re), связанные с углистыми и глинистыми горизонтами, накопились при осадконакоплении и на стадии диагенеза. При эпигенезе, U–Mo–Re руды осаждались окисленными подземными водами в результате их латеральной фильтрации через высокопроницаемые горизонты песков и концентрации металлов на восстановительных и сорбционных барьерах. Общее субгоризонтальное стратиформное строение рудной залежи осложнено наличием субвертикальных морфологических (раздувы мощности горизонта песков и их сильная пиритизация) и концентрационных (Re + Mo максимумы) рудными столбами. Они находятся в куполовидных структурах и нарушают горизонтальное залегание вмещающей осадочной толщи. Не исключено, что эти рудные столбы являются результатом гидротермально-гидравлических процессов, обусловленных деятельностью глубинных коровых (а с учетом рениеносности — и мантийных?) флюидов.

*Ключевые слова:* рений, уран, песчаниковый тип, речной, гидрогенный, бурый уголь, палеодолина.

**DOI:** 10.31857/S0024497X20030064

Рений — редчайший 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-порфирических месторождениях [Иванов и др., 1969; Бурденкова, 2002]. После распада СССР источников добычи этого остродефицитного элемента в России не осталось. Ежегодная его потребность для Российской Федерации составляет 5–10 т Re, которая покрывается его импортом [Бортников и др., 2016].

Основным источником мирового производства Re являются руды медно-порфирических месторождений. На единичных эксплуатируемых в России месторождениях порфирического и скарново-порфирического типов молибденовые концентраты (в основном накапливающие Re) не получают. Проведенная оценка минерально-сырьевой базы Re территории Российской Федерации показала, что в России наибольшим ресурсным потенциалом (3/4 от суммарного) обладает инфильтрационно-полиметалльный тип месторождений; в свою очередь, потенциал Подмосковной провинции составляет ~80% от ресурсов Re ука-

занного типа [Басков и др., 1993; Трач, Бескин, 2011]. Эти объекты отвечают, по классификации МАГАТЭ, гидрогенным месторождениям урана песчаникового типа [Гидрогенные ..., 1980; Машковцев и др., 2017; Wülser et al., 2011] или палеодоллинному (Южно-Техасскому) их подтипу [Халезов и др., 2009; Hall et al., 2017]. На них рений добывается как компонент, сопутствующий урану, методом скважинного подземного выщелачивания [Культин и др., 2007]. Данный метод обеспечивает 48% мировой добычи урана [In situ ..., 2017; Машковцев и др., 2017], и доля его с годами растет. В ходе оценочных работ ИМГРЭ в указанной провинции было разведано и в 2016 г. впервые в стране поставлено на баланс месторождение рения – гидрогенное U–Mo–Re **Брикетно-Желтухинское месторождение** в Рязанской области, приуроченное к горизонтам углей, залегающих в слаболитифицированных песках [Спиридонов и др., 2016; Левченко и др., 2019].

Буроугольные залежи в Скопинском районе Центральной России известны еще с конца 70-х годов XIX века. В 1954 г. трестом “Мосбасуглегеология” на площади Брикетно-Желтухинского месторождения в трех скважинах была выявлена повышенная радиоактивность угольных горизонтов, ураноносность которых была подтверждена специалистами Кировской экспедиции 1-го Главного геологоразведочного управления Мингео СССР. Следует отметить, что поиски урана в толщах осадочного чехла Русской и Скифской плит проводились с середины XX века, открыты 17 урановых месторождений и 60 рудопроявлений [Грушевой и др., 1996, 1999; Фоменко и др., 1999], однако большинство месторождений оценены как непромышленные. Кировской экспедицией были проведены поиски урана на территории Скопинского района Рязанской области, с бурением скважин по сети 200 × 200 м и участками ее сгущения до 100 × 100 м, и получена отрицательная оценка выявленного здесь мелко-Мо–U Брикетно-Желтухинского месторождения. В 1997–2005 гг. Горно-геологической экспедицией “Урангео” проведены дополнительные оценочные работы, которые привели к заключению о возможности отработки этого месторождения методом скважинного подземного выщелачивания. Однако низкие концентрации U в получаемых продуктивных растворах (3–7 мг/л) оказались значительно ниже допустимых для рентабельной добычи ( $\geq 20$  мг/л) [Методические ..., 2007]. В то же время концентрации Re в продуктивных растворах достигали 0.6–1.2 мг/л. Так, попутно было выявлено рениевое оруденение [Культин и др., 2007].

Месторождение в 2013–2015 гг. было детально изучено специалистами ИМГРЭ под общим руководством А.А. Кременецкого [Спиридонов и др., 2016; Карась и др., 2016, 2017]. Рениевое ору-

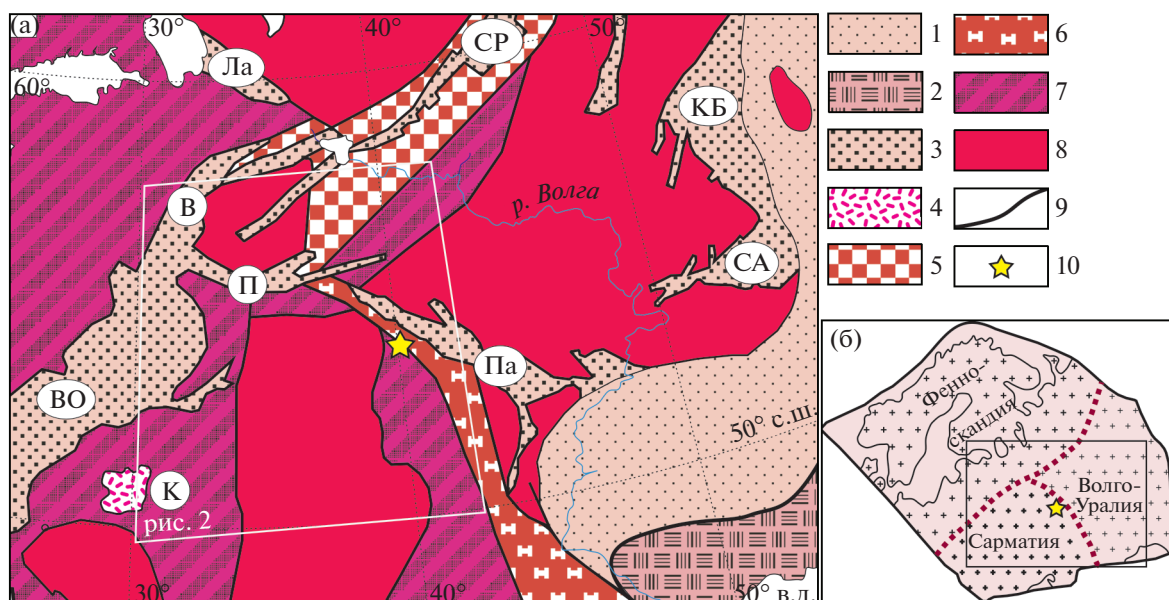
денение локализовано в аллювиальных песчаных отложениях бобриковского горизонта раннекаменноугольного возраста, залегающих на фаменских известняках и перекрытых более молодыми неоген-четвертичными песками и глинами [Карась и др., 2017]. Установлено два типа рудоносных пород: 1) алевропесчаные породы, обогащенные сульфидами; 2) угли, содержащие сульфиды [Карась и др., 2016; Кайлачаков, 2016].

В статье проведен анализ геологической позиции месторождения в структурах Восточно-Европейской платформы (ВЭП), а также геологоструктурных и литолого-фациальных факторов локализации U–Mo–Re оруденения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы для исследования были получены в результате оценочных работ (2013–2015 гг.) на рений и попутные компоненты на Брикетно-Желтухинском месторождении и их последующего анализа. Были пробурены вертикальные колонковые скважины (диаметр бурения 93 мм), которые пересекли неогеновые отложения, залегающие горизонтально и перекрывающие рудоносную толщу, и продуктивные горизонты визейского яруса, с углублением на 1–2 м ниже – в фаменские плотные известняки (“известняковый фундамент”). Второй автор настоящей статьи участвовал в детальной документации ядра, опробовании рудовмещающей песчаной толщи, построении геолого-геохимических колонок и разрезов. Документация ядра и радиометрические измерения осуществлялись после механической зачистки (от налипших фрагментов чуждых пород и следов от бурового инструмента) верхней части поверхности уложенного в ящик ядра (преимущественно рыхлого). Свежий ядро фотографировался для фиксации текстуры и исходной окраски пород. После этого проводилось детальное литологическое описание ядра [Карась и др., 2017].

Полученные данные позволили выяснить геологическое строение месторождения и провести оценку факторов локализации оруденения. Были также использованы результаты петрографических и геохимических исследований, выполненных в 2013–2015 гг. в лабораториях ИМГРЭ, а с 2015 г. и до настоящего времени – в ИГЕМ РАН. Основные методы изучения химического состава пород и руд включали: рентгено-флуоресцентный анализ, масс-спектрометрию с индуктивно связанной плазмой (ICP–MS), а также кинетический анализ (Re).



**Рис. 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 – Волыноско-Оршанский, СР – Среднерусский; 4 – палеопротерозойский Коростеньский плутон (К, габбро-анортозиты-рапакиви); 5–7 – комплексы палеопротерозойских аккреционных и коллизионных орогенов: 5 – Центрально–Русский ороген, 6 – ороген, объединивший Волго-Уранию и Сарматия, 7 – недифференцированные комплексы; 8 – архейские недифференцированные комплексы; 9 – главные разломы; 10 – Брикетно-Желтухинское месторождение.

**ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ 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. 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 выполнены рифейскими осадочными отложениями [Бибикина 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 свое 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 проведения работ протягивается субмеридиональный Двуреченско-Липецкий долгоживущий разлом – северное продолжение Лосевско-Мамонского разлома [Тектоническая карта ..., 1988].

В геологическом строении района выделяются два структурных этажа. Нижний – сильно дислоцированный и гетерогенный по своей природе докембрийский кристаллический фундамент [Бибикина 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: пологолежащий палеозойский (девонско—каменноугольный) и залегающий горизонтально, местами с ясно выраженным несогласием, мезокайнозойский (юрско—четвертичный).

Южная часть Московской синеклизы, включая рассматриваемый Скопинский район, входит в Подмосковский буроугольный бассейн [Павлова, Тимофеев, 2000], который характеризуется попутной металлоносностью. Месторождения угля в песчано-глинистых отложениях визе ( $C_{1V}$ ) локализованы, в основном, в южной части бассейна (рис. 2) — в широкой полосе, соответствующей Торопец—Рязано—Саратовской мегазоне (рис. 3), которая разделяет Сарматский и Волго-Уральский блоки Русской плиты [Чамов, Горбачев, 2004; Bogdanova et al., 2008] (см. рис. 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].

#### 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 палеодельта [Карась и др., 2017]. В основании вскрытого скважинами разреза представлены отложения фаменского яруса верхнего девона, которые сложены темно-серыми известняками с подчиненными доломитами и маломощными прослоями глин и мергелей. В фаменских породах встречается сульфидная минерализация в виде тонких слоев и рассеянной вкрапленности сульфидов [Карась и др., 2016; Кайлачаков, 2017].

Рудовмещающие отложения, залегающие выше, представлены бобриковской свитой визейского яруса каменноугольной системы, которая в пределах рудного поля имеет мощность до 60 м. Отложения бобриковской свиты в основном относятся к русловым и пойменно-болотным фациям. 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 сор-

тированные 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 и имеет ширину около 1 км (рис. 4).

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.

Породы бобриковского горизонта характеризуются преобладанием серой и темно-серой окраски, что типично не только для глинистоугольных прослоев, но и для песчано-алевритовых отложений (рис. 5). Природа этой окраски обусловлена их высокой насыщенностью углестым детритом, а также обилием дисульфидов железа, часто образующих псевдоморфозы по углестому 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 латеральных направлениях. Особенности строения аллювиальной толщи бобриковской свиты можно рассмотреть на примере представительной литологической колонки, построенной для скважины П-3 (табл. 1, см. рис. 5).

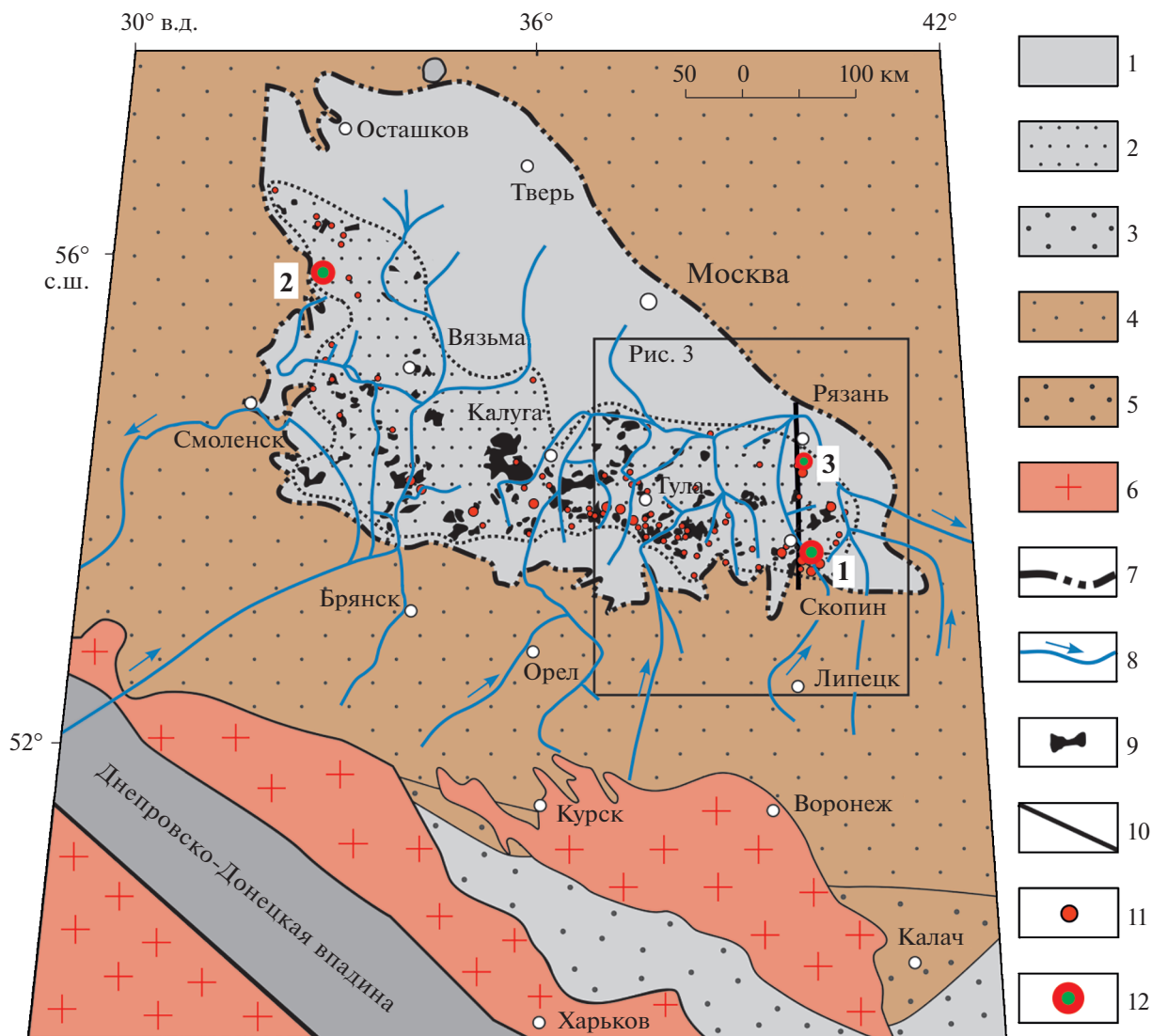
На известняках и доломитах фаменского яруса залегают песчано-глинистые отложения, включающие конкреции сульфидов диаметром до 0.5 см и прослой (до 5 см) углей с богатым рениевым оруденением (около 15 г/т Re).

В пределах интервала глубин 87—67.5 м наблюдается переслаивание мелко-среднезернистых песков коричневатого-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 глубин 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 углестого 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 глубин 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

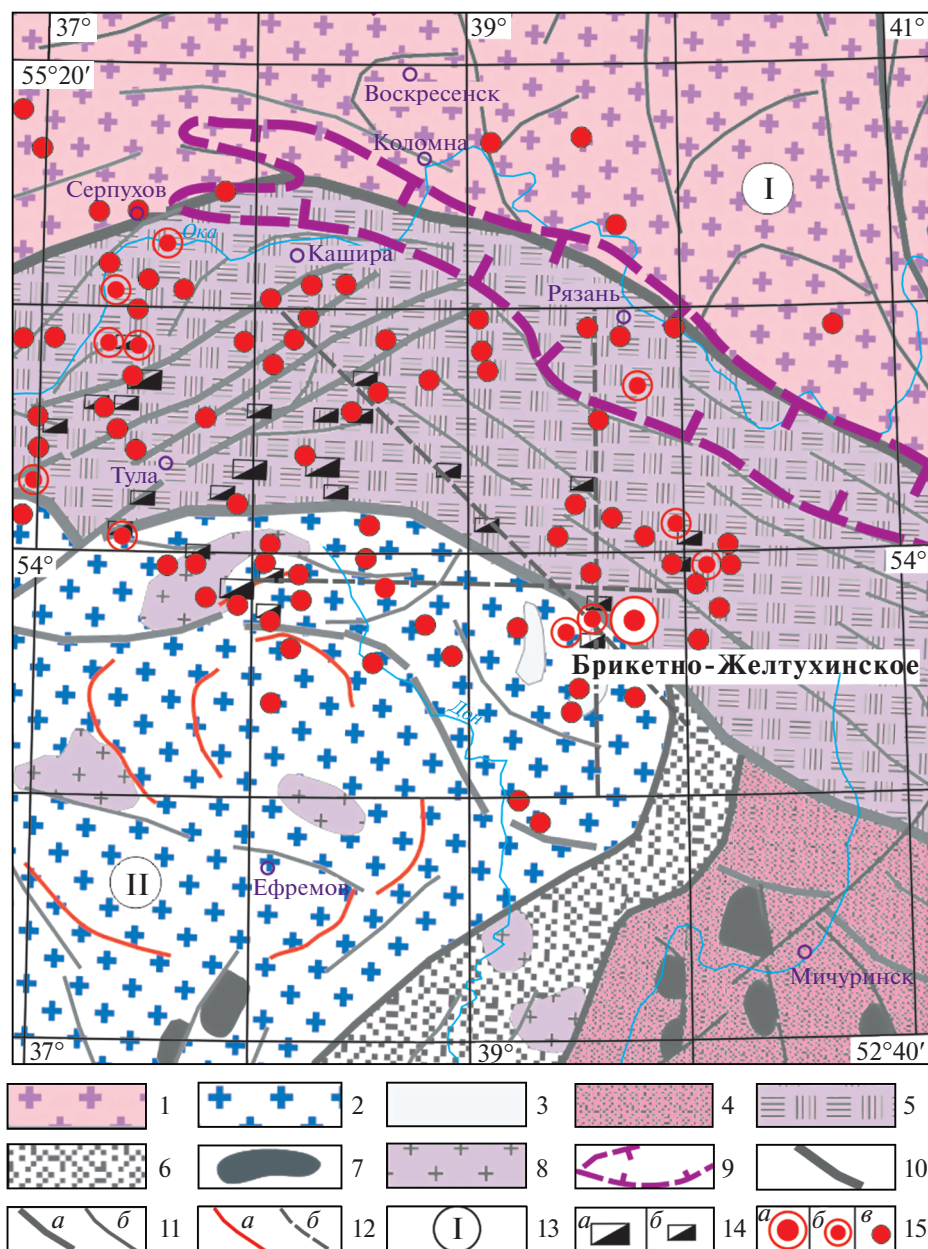


**Рис. 2.** Палеогеографическая реконструкция центральной части Восточно-Европейской платформы для ранне-среднедевонского времени, по [Палеогеоморфологический ..., 1983; Махлина, 1993; Карась и др., 2017] с изменениями. 1–3 – нижне-среднедевонские отложения: 1 – преимущественно глинистые (озерные и мелководно-морские 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 в области размыва; 7 – граница девонского Подмосковного бурого угольного бассейна; 8 – русла палеорек с направлением течения; 9 – болота (залежи 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).

кремнистый горизонт, мощностью до первых десятков сантиметров, сложенный крунозернистыми (до грубозернистыми) песками. Пески насыщены гравийными обломками кварца, кремней, реже встречаются обломки окремнелых известняков, содержащих кораллы позднедевонско-серпуховского возраста (*Chaetetes teniradiatus Sokolov* и *Dubinophyllum* sp. – определения О.Л. Коссовой, ВСЕГЕИ). К грубозернистому прослою приурочен тонкий горизонт окремнения мощностью 5–10 см – сплошного, вплоть до образования мас-

сивных кремней, или он состоит из отдельных, но обильных его желваков [Карась и др., 2017].

В латеральных направлениях 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



**Рис. 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].

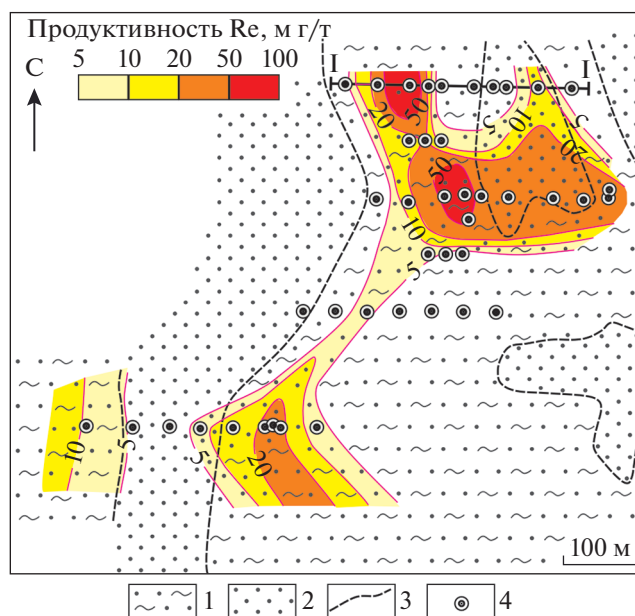
1, 2 – структурно-вещественные комплексы блоков с архейской континентальной корой: 1 – биотит-плагиоклазовые, плагиомикроклиновые гранитоиды, кристаллосланцы Волго-Уралии, 2 – кислые и средние плагиогнейсы, амфиболиты, кристаллосланцы, плагиограниты и мигматиты Сарматии; 3 – архейские зеленокаменные пояса; 4 – палеопротерозойские осадочно-вулканогенные комплексы внутриплитных рифтогенных структур и пассивных континентальных окраин; 5, 6 – межблоковые зоны, сформированных 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 (а) и третьего (б) порядков; 12 – прочие разломы: дуговые и кольцевые разломы, отشفрированные по космоснимкам (а), долгоживущие разломы (б); 13 – геоблоки (I – Волго-Уралия, II – Сарматия); 14 – месторождения угля (а – средние, б – малые); 15 – урана (а – малые месторождения, б – рудопроявления, в – радиоактивные аномалии).

оранжевой окраски, вероятно обусловленной окислением сульфидов с образованием Fe-гидроксидов.

Рудные зоны месторождения приурочены в основном к отложениям областей распространения потоковых и пойменных фаций – песчаным породам, насыщенным органикой (обломками угля, достигающими 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. 6, 7). 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 следующем Сообщении (2) статьи.

Перекрывающая неоген-четвертичная толща представлена чередованием песков, глин, алевритов 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, насыщенными гравийными, реже более крупными, обломками кремней и окремнелых известняков. К этому слою приурочен горизонт вторичного окремнения, в большинстве разрезов фиксирующий верхнюю границу рудоносной толщи (см. выше, интервал 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 воздей-



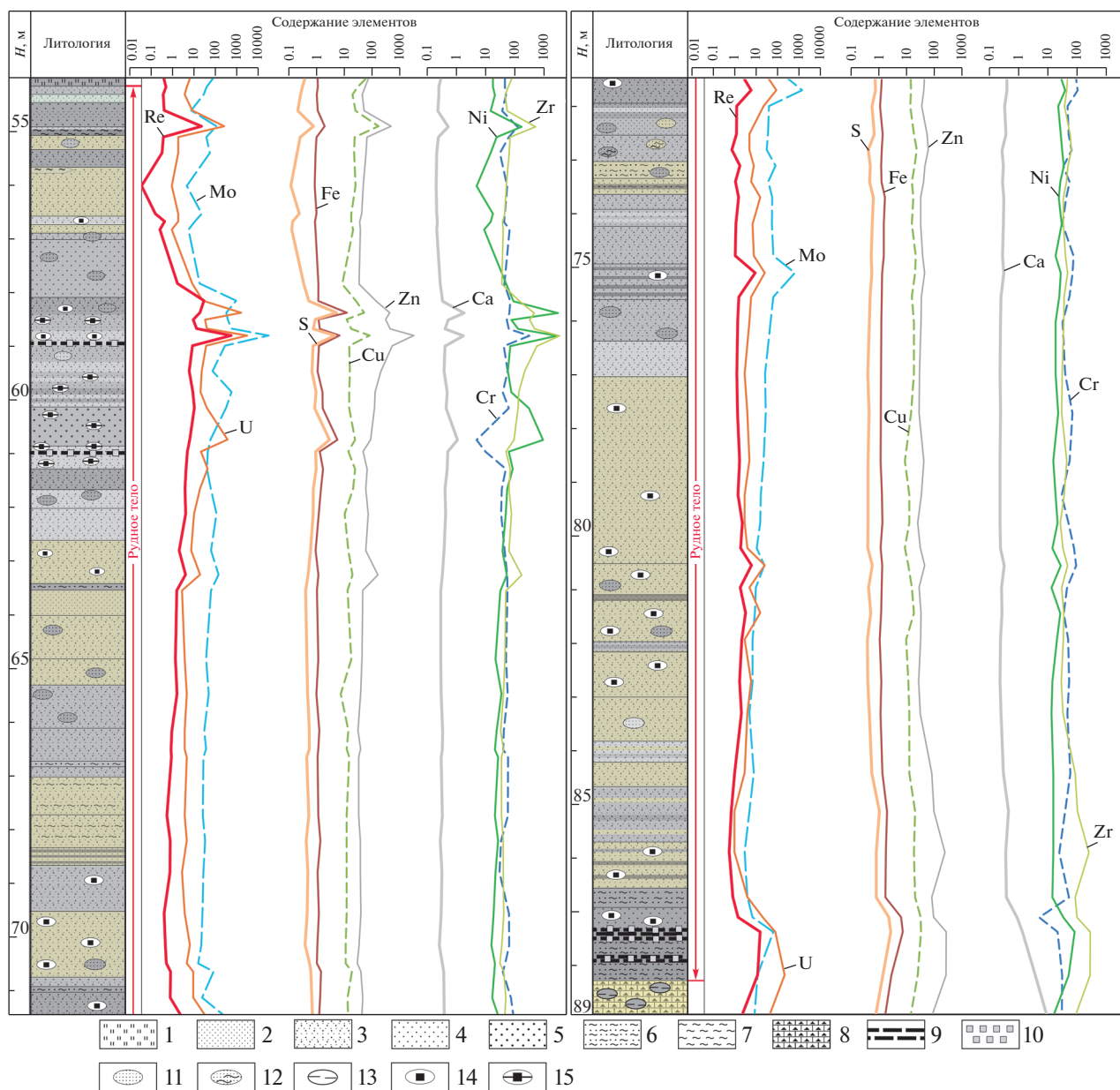
**Рис. 4.** Изолинии продуктивности рениевого оруденения в бобриковской свите Брикетно-Желтухинского месторождения на литолого-фациальной схеме, с линией разреза I–I, по [Карась и др., 2016, 2017] с изменениями.

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

ствием 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.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА РУДНЫХ ТЕЛ БРИКЕТНО-ЖЕЛТУХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

На Брикетно-Желтухинском месторождении по содержанию 0.1 г/т Re в породах, принятому в качестве бортового, была околочена практически единая рудная залежь, прослеживающаяся в пределах всей площади, изученной при оценочном бурении [Карась и др., 2016, 2017]. В плане залежь представляет собой слабоизвилистую субгоризонтальную ленту, протягивающуюся с севера на юг (см. рис. 4). В пределах залежи выделяются



**Рис. 5.** Литологическая колонка рудоносной бобриковской толщи, вскрытой скважиной П-3 (показана естественная окраска пород) и распределение в породах некоторых химических элементов. Величины содержания для Ca, S, Fe приведены в мас. %, для остальных элементов – в г/т.

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 – прослой углей; 10 – сульфиды; 11–15 – конкреции и стяжения уплотненного песка (11), песка глинистого (12), аргиллитов (13), сульфидов (14), сульфидов с обломками углей (15).

следующие типы рудных тел: 1) субпластовые 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; 2) отдельные тонкие (от 5 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 разномерных песках базального горизонта бобриковской свиты, насыщенных углистым дет-



**Таблица 1.** 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 коричневатого-серый, с серыми пятнами
55.65–56.55	Песок мелко-среднезернистый коричневатого-серый
56.55–57.0	Переслаивание песков мелко-среднезернистых коричневатого-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 (6 × 3 см) линзами песчаников темно-серых, углистых, с прослоями сульфидов
58.9–58.95	Уголь черный, с тонкими (до 2 мм) слоями 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) слоями сульфидов
60.1–60.8	Песок крупнозернистый серый, с редкими обломками угля черного с тонкими слоями сульфидов
60.8–61.0	Песок мелко-среднезернистый серый, с прослоями и стяжениями песка уплотненного с обломками угля и тонкими слоями 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 коричневатого-серый, с редкими конкрециями сульфидов
63.4–63.5	Песок глинистый темно-серый до черного
63.5–65.3	Песок мелко-среднезернистый коричневатого-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 коричневатого-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 коричневатого-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 коричневатого-серого песка
72.5–73.6	Песок мелко-среднезернистый, местами глинистый, коричневатого-серый и серый, с прослойками (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 коричневатого-серый, с редкими конкрециями сульфидов
80.4–83.6	Песок мелко-среднезернистый, местами уплотненный, коричневатого-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 коричневатого-серых
85.45–86.3	Песок мелко-среднезернистый коричневатого-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

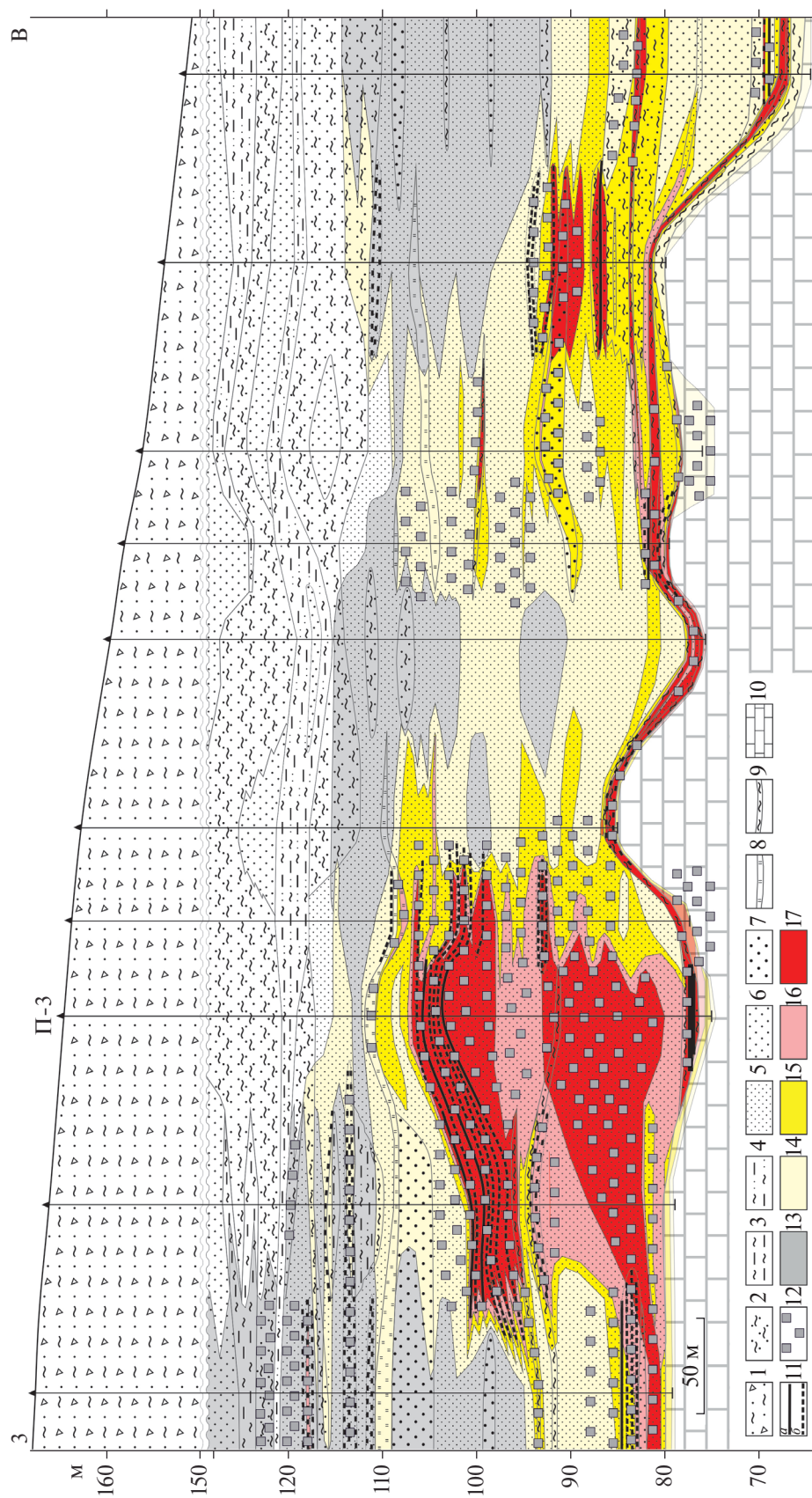


Рис. 6. Разрез рудоносной бобриковской толщи по линии П-1 и распределение рения в породах, по [Карась и др., 2017] с уточнениями и дополнениями. 1 – неоген–четвертичные песчано–глинистые отложения; 2–9 – бобриковская свита (нижний–средний визе): 2 – глины плотные песчанистые с прослоями песков, 3 – переслаивание алевролитов и глин, 4 – переслаивание песков, алевролитов, глин и их разновидностей, 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 Re, г/т (13 – <0.01; 14 – <0.1; 15 – <0.5; 16 – <1.0; 17 – >1.0).

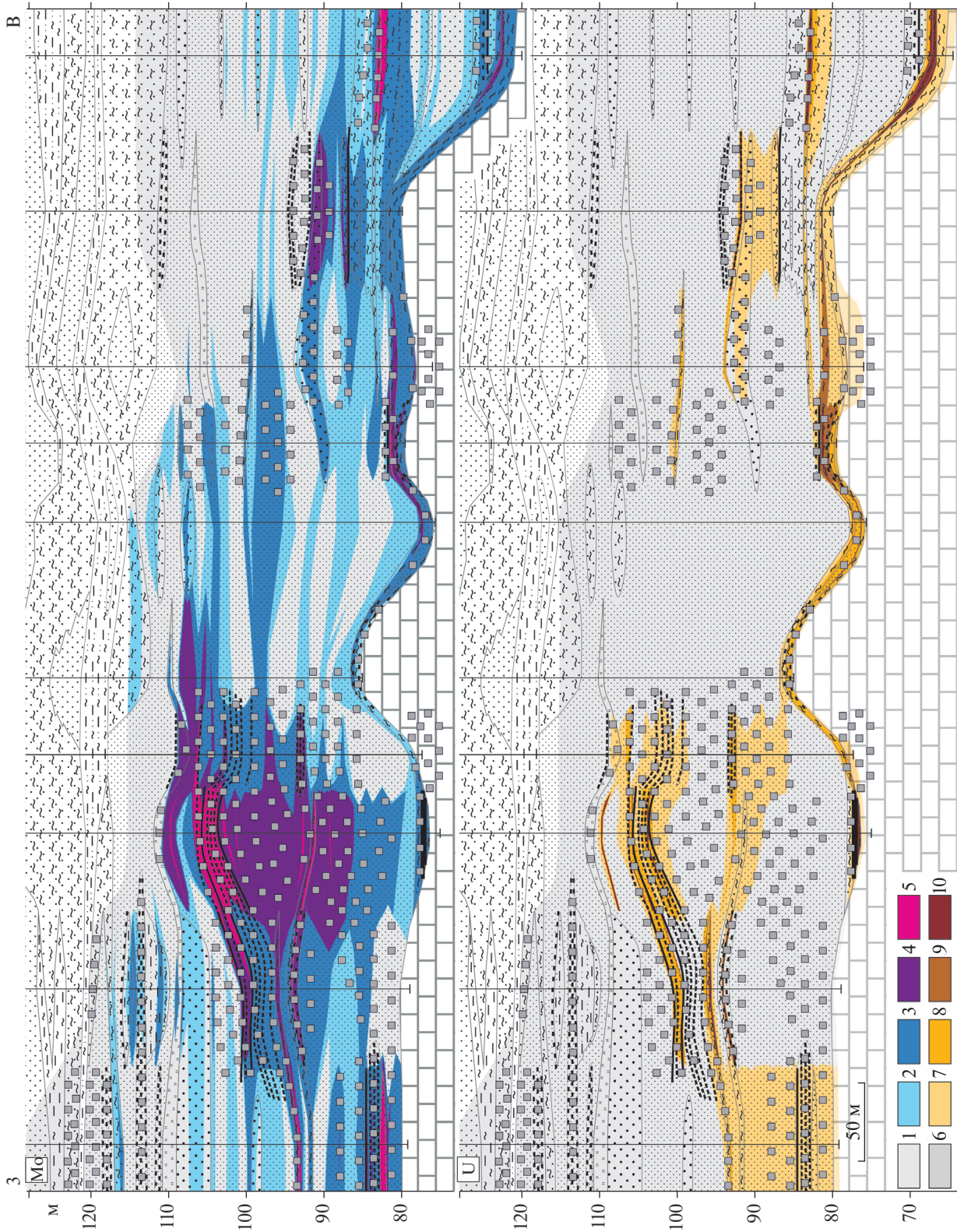


Рис. 7. Разрез рудоносной бобриковской толщи по линии I—I и распределение молибдена и урана в породах, по [Карась и др., 2017] с уточнениями и дополнениями. 1–5 – содержание Mo, г/т (1 – <3; 2 – <10; 3 – <30; 4 – <100; 5 – >100); 6–10 – содержание U, г/т (6 – <10; 7 – <30; 8 – <100; 9 – <200; 10 – >200).

ритом, выше водоупорных известковистых глин, залегающих в кровле подстилающей толщи фаменских известняков.

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  $\sim 5-8$  м, достигая в раздувах 15–35 м. Ширина этой субгоризонтальной ленты составляет 500–700 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  $C_2^1$  [Карась и др., 2017].

Содержание  $C_{орг}$  в песках изменяется в широких пределах: от первых сотых долей процента 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 (см. рис. 5, 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 углесто-глинистых пропластках мощностью 5–10 см ( $40-637$  г/т), причем наиболее высокие содержания приурочены к слоям этих пород, залегающим в кровле и, местами, в подошве рудной залежи. В песках содержания  $Re$  достигают 10–50 г/т [Спиридонов и др., 2016; Карась и др., 2017] (см. рис. 5, 6).

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 и др.], обращают на себя внимание развитые в ее пределах структурные элементы, нарушающие послыное распределение полезных компонентов. В отдельных поперечных разрезах субгоризонтальное залегание песчаной толщи осложнено раздувами, связанными с увеличением мощности отдельных горизонтов песков. Эти раздувы обусловлены как прогибами подошвы бобриковского горизонта в понижениях кровли

подстилающих фаменских известняков, так и куполообразными изгибами слоев в вышележащей песчаной толще, подчеркнутых прослоями углей (см. рис. 6). Такие гребне- и куполовидные изгибы слоистости могли быть вызваны постседиментационными деформациями рудовмещающей толщи, природа которых не ясна. С учетом того, что отложения бобриковской свиты в настоящее время являются преимущественно слаболитифицированными 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 песчаной толщи и “гребней” воздымания вышележащих слоев, залегающих ближе к кровле бобриковской толщи, возникают своеобразные би-клинальные структуры (например, в районе скв. П-3, см. рис. 6). Важно, что именно эти участки раздувов мощности песков обусловили появление не только морфологических, но и концентрационных *рудных столбов*. Поэтому в изученных нами разрезах присутствуют субвертикальные участки повышенных и максимальных значений содержания металлов, особенно отчетливо выраженные в картинах распределения  $Re$  и  $Mo$  (см. рис. 6, 7). При этом такое же распределение характерно для сгущений рассеянно-вкрапленной пиритизации, тяготеющей к вышеупомянутым “столбам”. Важно отметить, что в керне скважин, пересекающих фаменские известняки, в последних также фиксируется пиритизация, в них развиты в целом не характерные для известняков зоны брекчий, маломощные кварц-карбонатные прожилки и участки доломитизации. Вероятно, эти зоны брекчирования маркируют позицию подводящих каналов, питающих низкотемпературную гидротермально-гидравлическую систему, которая обусловила формирование этих куполовидных морфоструктур.

#### ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ СИН-ЭПИГЕНЕТИЧЕСКОГО U–Mo–Re ОРУДЕНЕНИЯ

Отложения бобриковской свиты, представленные не литифицированными и крайне слабо литифицированными разнородными, умеренно и плохо сортированными песками, формировались в конце раннего–первой половине среднего виве. 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 виве гумидизация климата уступила место его аридизации (угли исчезают из разреза) [Швецов, 1954; Геологическая карта ..., 1968]). Параличе-

<sup>1</sup> А, В,  $C_1$  и  $C_2$  – принятые в СССР и России категории запасов полезных ископаемых (в данной случае – металлов), отвечающие разной (уменьшающейся от А к С) степени разведанности или разному уровню достоверности и варьирующие – прежде всего в отношении требований к плотности разведочной сети – в зависимости от вида ископаемого и отнесения к группе сложности геологического строения месторождения. Запасы металла категорий А + В в рудном месторождении весьма условно можно считать отвечающими понятию “proved reserves”, а  $C_1 + C_2$  – “probable reserves”.

ская 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 вулканомитовый материал, вероятно, были обогащены тяжелыми металлами, которые накапливались в терригенных осадках в малых надкларковых концентрациях, отчасти сорбируясь растительным детритом и глинистыми частицами.

Высказанное ранее предположение [Карась и др., 2017] о существовании в районе северного плеча Днепровско-Донецкого рифта области размыва, в которой в визейское время мобилизовались металлы (Re, Mo, U) и впоследствии переносились речными потоками на север, представляется маловероятным, т.к. на пути следования предполагаемых потоков находилась суша — крупный Воронежский выступ кристаллических пород фундамента Восточно-Европейской платформы (ВЕП) (см. рис. 2).

Основные промышленные U—Mo—Re руды сформировались в эпигенезе, гидрогенным способом при латеральной фильтрации подземных вод по высокопроницаемым горизонтам бобринской свиты; эти воды переотлагали компоненты сингенетических послыбно—рассеянных рудных скоплений в результате действия геохимических (сорбционный и восстановительный барьеры) и гидродинамических (изменение скорости потока при вариациях проницаемости песков разной природы) факторов. Предполагаемый возраст инфильтрационных процессов, перераспределявших и отлагавших U, Mo, Re, Se и др. элементы рудной ассоциации, в Скопинском районе соответствовал среднекаменноугольному, пермскому и мезозойскому временным интервалам [Карась и др., 2017].

К важным факторам образования U—Mo—Re скоплений в породах осадочного чехла Русской плиты, помимо геоморфологического (долина Скопинской палеореки), седиментационно-диагенетического и палеогидрогеологического, кратко рассмотренных выше и более детально охарактеризованных для сходных по генезису месторождений урана в песчаных толщах Средней Азии, Зауралья, юга Восточной Сибири [Лисицин, 1975; Кисляков, Щеточкин, 2000; Халезов, 2009; Кочкин и др., 2014], могут быть также отнесены тектонический и магматический факторы [Грушевой и др., 1996, 1999]. Из пяти крупнейших эпох тектономагматической активизации [Гру-

шевой и др., 1996], осложнявших плитное осадко-накопление, для Скопинского района наиболее значимыми могли быть девонская, триасово-юрская, мел-палеогеновая и неоген-четвертичная. С девонским периодом в центральной части и на юге ВЕП связаны подновление многочисленных глубинных разломов и этап регенерации авлакогенов (Днепровско-Донецкий, Кировский, Доно-Медведицкий), с повторным их прогибанием [Грушевой и др., 1996; Иванова, Грушевой, 2009]. Девонская активизация отличается проявлениями щелочных базальтоидов, трахибазальтов и щелочно-ультраосновного интрузивного магматизма в краевых частях названных авлакогенов (см., например [Петров, 1969; Puchkov et al., 2016]), в т.ч. на южном (Днепровско-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, или LIP) [Милановский, 1996; Nishin et al., 2002; Puchkov, 2002; Ernst, Bell, 2010]. Интенсивный базальтоидный вулканизм отмечен в среднем—позднем девоне Донбаса [Пучков, 2010]. 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 (Вятские, Саратовские, Доно-Медведицкие, Сокско-Шешминские и др.) на востоке платформы. 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.

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 трассируемые вверх по восстанию ограничивающие их разломы, 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 флюидопроводниками, вероятно 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, соответствующая седиментации и диагнезу), 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 и ~200 млн лет назад, вероятно всего, отвечали процессам тектонической активизации, связанным с коллизионными событиями на Урале и в центральном сегменте Альпийско-Гималайского пояса.

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

Согласно **эпигенетической модели** [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.

Наиболее приемлемой для рассматриваемого объекта нам представляется **комбинированная син-эпигенетическая модель** образования месторождения палеодолинного типа. Она включает, с одной стороны, участие синхронных осадконакоплению и диагнезу процессов, обеспечивающих частичную, относительно невысокую **суб-промышленную** концентрацию металлов, серы и селена на геохимических барьерах: *восстановительном* (за счет обилия растительного детрита и пирита) и *сорбционном* (глинистые и железо-гидроксидные осадки). Вмещающие эту суб-промышленную U ( $\pm$ Mo, Re) минерализацию песчаные отложения (бобриковская толща) формировались в поймах меандрирующих небольших рек, в насыщенных растительными остатками старицах, дельтах, лиманах или в теплом мелководном море, изобилующем отмелями.

С другой стороны, промышленно значимые **рудные концентрации** формировались на эпигенетической стадии, в результате гидрогенного минералообразования, происходившего в связи с латеральным движением кислородсодержащих подземных вод по высокопроницаемой толще плохо сортированных песков. Помимо участия геохимических барьеров (угли, послойные зоны тонкой пиритовой вкрапленности), в этом случае важными элементами модели становятся *восстановительные барьеры* на фронте поднимающихся вод глубинной циркуляции, которые мигрировали в фаменских известняках вверх по разломам, корни которых уходили в кристаллический фундамент. Важный вклад этого фактора подчеркивается необычной морфологией рудной залежи со столбообразными раздувами мощности и концентрационными “столбами” Mo и Re. Несомненно также участие *гидродинамического* фактора, обусловившего изменения скорости фильтрации вод при пересечении многочисленных горизонтов сложно и незакономерно переслаивающихся, контрастных по гранулометрии плохо- и умеренно-сортированных дельтовых и русловых осадков, мощность которых в латеральных направлениях существенно менялась. Эти осадки накапливались у северного края холмистой суши, резко переходящей в пологое побережье мелководного морского бассейна лагунного типа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Брикетно-Желтухинское U–Mo–Re месторождение в Подмосковном бурогольном бассейне

не 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 разнозернистых умеренно- и плохосортированных песков, содержащих углефицированный растительный детрит и пропластки бурых углей, накапливавшихся в аллювиальных и мелководно-морских условиях на фоне теплого влажного климата. Паралическая угленосность, характерная для каменноугольного периода, и накопление сероцветной толщи высокопроницаемых плохосортированных песков с фоновой пиритизацией, в дальнейшем стали основными факторами, обеспечившими промышленную рениеносность Брикетно-Желтухинского месторождения.

3. Строение бобриковской свиты сильно изменчиво по разрезу и в латеральных направлениях; 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. Предложена комбинированная син-эпигенетическая модель образования U–Mo–Re месторождения палеодолинного типа. Модель включает как процессы осадконакопления и последующего диагенеза, происходившие с образованием субпромышленных послонных скоплений U ( $\pm$ Mo, Re), приуроченных к углистым и глинистым горизонтам, так и более поздние эпигенетические процессы гидрогенного минералообразования, связанные 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.

5. Для образования U–Mo–Re скоплений в осадочных породах чехла Русской плиты, к важнейшим нами отнесены тектонический и магматический факторы, вызывавшие 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. Таким образом, важными элементами модели для эпигенетической стадии являются восстановительные барьеры при встрече латерально мигрирующих подземных вод с поступающими вверх по разломам, нарушающим фаменские известняки подошвы песчаной толщи, потоками вод глубинной циркуляции.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.А. Кременецкому и С.А. Карасю (ИМГРЭ) за организацию полевых работ и всестороннюю помощь; особую признательность — руководству ИМГРЭ за предоставление материалов для исследований. Мы признательны Н.Б. Кузнецову и Н.П. Чамову (ГИН РАН) — за поддержку и предоставление картографических материалов по ВЕП; В.А. Петрову и О.А. Дойниковой (ИГЕМ РАН), прочитавшим рукопись и сделавшим ряд ценных замечаний.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по базовой теме ИГЕМ РАН, регистрационный номер 0136-20140010; работа поддержана проектом РФФИ № 19-35-90095 (Аспиранты) и проектом IGCP 675 Sandstone Type Uranium Deposits.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Бибикова Е.В., Богданова С.В., Постников А.В. и др.* Зона сочленения Сарматии и Волго–Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракрустальных пород и гранитоидов // *Стратиграфия. Геол. корреляция.* 2009. Т. 17. № 6. С. 3–16.
- Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др.* Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // *Геология рудных месторождений.* 2016. Т. 58. № 2. С. 97–119.
- Бурденкова Н.Н.* Рений. Тенденции в развитии мирового рынка. М.: ИМГРЭ, 2002. 95 с.
- Геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 200000. Серия Московская. Лист N-37-XXII. Объяснительная записка / Составитель Ф.И. Урусбиева. М.: Недра, 1968.

- Гидрогенные месторождения урана. Основы теории образования / Ред. А.И. Перельман. М.: Атомиздат, 1980. 270 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000. Серия Центрально–Европейская Лист N-37 – Москва. Объяснительная записка / Составитель В.П. Кириков. СПб.: ВСЕГЕИ, 2015.
- Грушевой Г.В., Оношко И.С., Наумов С.С. Прогнозная оценка ураноносности чехла Русской платформы // Разведка и охрана недр. 1996. № 3. С. 11–20.
- 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.
- Егоров А.С. Глубинное строение и геодинамика литосферы Северной Евразии (по результатам геолого-геофизического моделирования вдоль геотравверсов России). СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. 200 с.
- 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.
- Иванов В.В., Поплавко Е.М., Горохова В.Н. Геохимия рения. М.: Наука, 1969. 160 с.
- 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.
- 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. С. 24–29.
- Кайлачаков П.Э. Сульфидная минерализация руд уран–молибден–рениевого Брикетно-Желтухинского месторождения (Подмосковный бассейн) // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2017. № 3. С. 353–360.  
<https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-3-353-360>
- Карась С.А., Кременецкий А.А., Орлов С.Ю. и др. Новый геолого-промышленный тип гидрогенных месторождений рения // Разведка и охрана недр. 2017. № 8. С. 20–27.
- Карась С.А., Культин Ю.В., Кременецкий А.А. и др. 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.
- Карта новейшей тектоники Северной Евразии. Масштаб 1 : 5000000 / Ред. А.Ф. Грачев. М.: МПР РФ, РАН, 1997.
- Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н. Гидрогенное рудообразование. М.: Геоинформмарк, 2000. 608 с.
- 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.
- Копп М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы // Тр. ГИН РАН. Вып. 552. М.: Наука, 2004. 340 с.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Лисицин А.К. Гидрогеохимия рудообразования (на примере экзогенных эпигенетических урановых руд). М.: Недра, 1975. 248 с.
- Махлина М.Х., Вдовенко М.В., Алексеев А.С. и др. Нижний карбон Московской синеклизы и Воронежской антеклизы. М.: Наука, 1993. 221 с.
- Машковцев Г.А., Мигута А.К., Тарханов А.В., Щеточкин В.Н. Урановорудный потенциал России 2015–2035 // Минеральное сырье. Вып. № 33. М.: ВИМС, 2017. 119 с.
- Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Радиоактивные металлы. М.: ГКЗ МПР России, 2007.
- Милановский Е.Е. Геология России и ближнего зарубежья (Северной Евразии). М.: Изд-во МГУ, 1996. 448 с.
- Павлова Л.С., Тимофеев А.А. Подмосковный бурогольный бассейн // Угольная база России. Т. 1. М.: Недра, 2000. С. 107–130.
- Палеогеоморфологический атлас СССР. Карты палеорельефа и коррелятных отложений / Ред. А.В. Сидоренко. Л.: ВСЕГЕИ, 1983.
- Петров В.Г. Особенности строения Калужской структуры // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1969. Т. 44. Вып. 6. С. 36–42.
- Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- 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.

*Спиридонов И.Г., Килинко В.А., Левченко Е.Н., Ключарев Д.С.* Основные задачи геохимического картирования и поиски новых источников нетрадиционного редкометаллического сырья // Разведка и охрана недр. 2016. № 9. С. 115–122.

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.

*Трач Г.Н., Бескин С.М.* Ресурсный потенциал рения территории России // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 26–32.

*Трегуб А.И.* Неотектоника территории Воронежского кристаллического массива // Тр. Научно-исслед. института ВГУ. Вып. 9. Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 2002. 220 с.

*Фоменко А.Е., Сазонов В.П., Дмитраков Л.И.* Особенности размещения уранового оруденения Подмосквой ураноносной области // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. Вып. 140. М.: ВИМС, 1999. С. 5–14.

*Халезов А.Б., Долбиллин С.И., Марков С.Н. и др.* Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона. М.: ВИМС, 2009. 145 с.

*Халезов А.Б.* К вопросу о расширении минерально-сырьевой базы рения в Российской Федерации // Разведка и охрана недр. 2009. № 8. С. 13–17.

*Чамов Н.П.* Локальная тектоника и седиментация в грабенах Среднерусского авлакогена (Восточно-Европейская платформа) // Литология и полез. ископаемые. 2015. № 6. С. 549–562.

*Чамов Н.П.* Тектоническая история и новая модель формирования Среднерусского авлакогена // Геотектоника. 2005. № 3. С. 3–22.

*Чамов Н.П., Горбачев В.И.* Строение и состав пород Бельского поднятия Подмосквой авлакогена // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2004. Т. 79. Вып. 4. С. 3–10.

*Швецов М.С.* Геологическая история средней части Русской платформы в течение нижнекаменноуголь-

ной и первой половины среднекаменноугольной эпох. М.: ВНИГРИ, 1954. 79 с.

*Bogdanova S.V., Bingen B., Gorbatschev R. et al.* The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia // Precambrian Res. 2008. V. 160. P. 23–45.

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

*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.

*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.

*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.

*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.

*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. <https://doi.org/10.1080/11035897.2015.1118406>

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>

*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.

## The Unique Deposit of Rhenium in the Coal-bearing Carboniferous Sands of the Russian Plate. Communication 1. Geological Structure

I. V. Vikentyev<sup>1, 2, #</sup>, P. E. Kailachakov<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Staromonetny per., 35, Moscow, 119017 Russia*

<sup>2</sup>*Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, 117198 Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: viken@igem.ru*

The Briketno-Zheltukhinskoe U–Mo–Re deposit in the southern sector of the Moscow Lignite Basin (central part of the East European platform) localized in paleo-channel and deltaic coal-bearing sandy sediments of the Bobrikovsky horizon of Visean age, lying on the Famennian limestone, and covered by younger Neogene–Quaternary sand and clay. In tectonic terms, the position of the deposit corresponds to the South shoulder of the Pachelma Aulacogen, cross-cutted by SN-trending fault zone. The presence of a thick gray-colored unit of mixed-grained moderately and poorly sorted sands containing carbonaceous plant detritus

constitutes one of the major lithologic-facies factors of localization of U–Mo–Re mineralization. The sand-dominated Bobrikovsky series was accumulated in fluvial, swamps inland, onshore delta-plain and shallow-sea lagoonal environments accompanied by a warm humid climate. A combined syn-epigenetic formation model of the U–Mo–Re paleovalley type deposit is proposed. Subeconomic stratabound U ( $\pm$ Mo, Re) mineralization associated with carbonaceous and clayey horizons was accumulated during sedimentation and at the stage of diagenesis. During epigenesis, U–Mo–Re ores were deposited by oxidized groundwater as a result of their lateral filtration through highly permeable sand horizons and metal concentrations at the reduction and sorption barriers. General subhorizontal stratiform structure of the ore deposit is complicated by the presence of sub-vertical morphological (swell of sand horizon plus strong pyritization) and concentration (Re + Mo column-like maximums) ore shoots. They occur in domed structures that disturb the horizontal structure of the host sedimentary unit. It is possible that these domes and ore shoots are the result of hydrothermal-hydraulic processes caused by the activity of deep crustal fluids and, taking into account the rhenium-abundance, probably of mantle fluids as well.

*Keywords:* rhenium, uranium, sandstone–hosted type, fluvial, hydrogenic, lignite, paleovalley.