ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, 2022, том 64, № 1, с. 113–134

УДК 550.4

ТИПИЗАЦИЯ ГИДРОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

© 2022 г. С. Ф. Винокуров*

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

**e-mail: aigidos2005@yandex.ru*

Поступила в редакцию 20.06.2019 г.
После доработки 13.05.2021 г.
Принята к публикации 08.06.2021 г.

В результате анализа материалов по гидрогенным месторождениям урана, образованным в результате деятельности обогащенных ураном и сопутствующими элементами грунтовых и пластовых вод, выделено пять типов объектов. Первый по литературным данным, а остальные охарактеризованы по детальным работам автора. Основными принципами для типизации послужили проявленность и соотношение инфильтрационных и эксфильтрационных процессов, отраженных в эпигенетической рудоконтролирующей зональности. Первые три типа – инфильтрационно-окислительный и восстановительный, эксфильтрационно-восстановительный, являются монохронными с единым ведущим геохимическим барьером и включают преимущественно мелкие и средние месторождения урана. Остальные два типа – инфильтрационно-эксфильтрационный и эксфильтрационно-инфильтрационный – имеют полихронный и полигенный характер со сложным сочетанием геохимических барьеров и представлены средними и крупными по запасам урана месторождениями. Им присуще наличие богатых руд с содержанием урана более 0.5% и сопутствующих РЗЭ, а также характерна отработка экологичным методом скважинного подземного выщелачивания, исключая приповерхностные месторождения первого типа.

Ключевые слова: типизация, месторождение, уран, гидрогенные, инфильтрация, эксфильтрация, окислительный, восстановительный, зональность, вертикальная, горизонтальная

DOI: 10.31857/S0016777022010099

ВВЕДЕНИЕ

Гидрогенными месторождениями урана являются рудные объекты, которые сформированы грунтовыми и/или пластовыми низкотемпературными и телетермальными водами, обогащенными ураном и сопутствующими элементами, и распространены на всех континентах мира в проницаемых осадочных и вулканогенных отложениях от конца палеозоя до кайнозоя включительно. Этим промышленным урановым месторождениям принадлежит одно из первых мест в мире по запасам урана, т.к. кроме песчаникового к ним относится класс поверхностных месторождений (Винокуров, 2009). Типизация гидрогенных месторождений производилась по литологическому, генетическому, гидрогеологическому и другим признакам (Лаверов и др., 1986; Шмариович, 1986; Кисляков, Щеточкин, 2000; World, 2009; Машковцев и др., 2010). В настоящее время актуальность рассмотрения этого вопроса существенно возросла в связи с тем, что гидрогенные месторождения урана Витимского района с запасами порядка 100 тыс. т урана, добываемые дешевым и экологическим методом ПВ, заняли ведущее место по экономическим показателям в сырьевой базе атомной промышленности РФ.

Наиболее полно типизация рассмотрена в монографии “Гидрогенное рудообразование” (Кисляков, Щеточкин, 2000). В ней практически все гидрогенные месторождения урана отнесены к инфильтрационному классу, в котором выделяются 3 подкласса – пластово-, грунтово- и трещинно-инфильтрационный. Доминирующая часть их попадает в первые два подкласса, подразделяющиеся по геотектонической обстановке на орогенные и тектоно-эвстатические. Дальнейшее их деление производится по типу металлоносных вод, рудоосаждающих геохимических барьеров и рудных геохимических ассоциаций. По этим признакам выделяются многочисленные типы гидрогенных месторождений урана, которые иллюстрируются соответствующими примерами.

При этом констатируется роль эксфильтрационных процессов, т.е. воздействие восходящих углекисло-битумных термальных (120–200°C) растворов на интенсивность отложения урана и сопутствующих элементов, а также на характер эпигенетической зональности в Сугра-

линском и Букинайском рудных полях (Винокуров, Меньшиков, 1995; Кисляков, Щеточкин, 2000). Несмотря на это, проявления эксфильтрационного режима не учитываются при типизации гидрогенных месторождений урана, т.к. считается, что доминирующая часть урана и элементов-спутников привносится нисходящими инфильтрационными водами, а эксфильтрационное перераспределение имеет местный, локальный характер. По этой классификации к эксфильтрационным относятся месторождения Fe, Mn, Cu, Pb–Zn и другие, для которых восходящие телетермальные воды служили источником соответствующих элементов.

Вопросы источников урана и сопутствующих элементов не обсуждаются, т.к. предполагается, что ими могут быть любые породы фундамента, а основная роль отводится аридизации климата, которая повышает почти на порядок содержание элементов в грунтовых водах (Кисляков, Щеточкин, 2000). Следует в связи с этим отметить, что влияние локальных источников сказывается на распределении сопутствующих элементов. Так, самое северо-восточное месторождение Вараджан Букинайского рудного поля является существенно молибденовым, а иордизит –главным рудным минералом, тогда как на юго-восточном Кенимехском месторождении отмечаются только повышенные содержания молибдена при близкой литологии рудовмещающих осадков.

В зарубежной литературе гидрогенные месторождения урана относятся преимущественно к песчаниковому классу, в котором по классификации МАГАТЭ выделено несколько типов по морфологии оруденения, характеру восстановителя и т.д.: ролловый, пластообразный, с детритовым углеродом, с чужеродным углеродом, с чужеродным сульфидом, ванадий-урановые и т.п. (Word..., 2009; Винокуров, 2009). К этим же объектам принадлежит класс поверхностных месторождений урана, включающий калькреты Йилирри.

Следовательно, в существующих типизациях гидрогенных месторождений урана мало использованы в качестве основного признака нисходящий и восходящий режимы вод, отраженные в рудоконтролирующей эпигенетической зональности. По нашим данным, эксфильтрационные углекислые термальные воды играли значительную, иногда ведущую роль в образовании урановых руд, особенно богатых. Ведь они могли быть восстановительными для железа, но не для урана. Эффект от перераспределения урана этими водами может быть от заметного до доминирующего. К локальным факторам относятся также аномалии и проявления урана в породах фундамента рудного поля.

Автор публиковал работы по различным вопросам геологии и происхождения гидрогенных месторождений урана, начиная с 70-х годов до последнего времени (Винокуров и др., 1970–2017). Главным альтернативным принципом выделения типов считалось проявление и соотношение инфильтрационных и эксфильтрационных процессов при формировании гидрогенного уранового оруденения, которое контролируется эпигенетической зональностью. В связи с этим выделяются типы месторождений, причем каждый тип подтверждается фактическими данными по детально изученному месторождению или их ряду. При этом слюдковый тип представлен минералами шестивалентного урана, контролирующей вертикальной зональностью и противопоставляется остальным с четырехвалентным ураном и горизонтальной рудоконтролирующей зональностью. Среди них имеются как простые монохронные, так и сложные полигенные месторождения, сформированные при последовательном воздействии процессов инфильтрации и эксфильтрации в том или ином порядке.

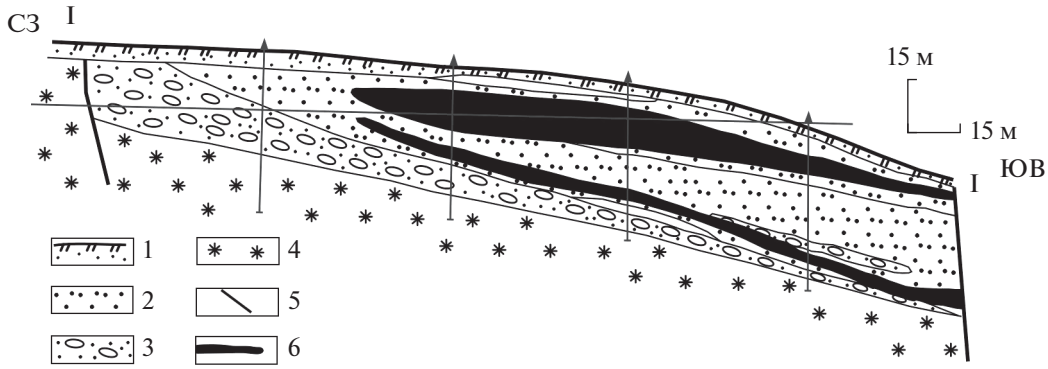
ТИПЫ ГИДРОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

К настоящему времени собран фактический материал для выделения основных типов гидрогенных месторождений урана, образованных различными по генезису грунтовыми и/или пластовыми водами. Рассмотрение необходимо для сопоставительного факторного анализа этого большого класса урановых месторождений с целью разработки их детальной геолого-генетической типизации, уточнения комплекса поисково-оценочных критериев и выделения наиболее перспективных типов для различных районов РФ.

1 тип. Инфильтрационно-окислительный

Примером для этого типа послужило уникальное месторождение Йилирри (Западная Австралия) в калькретах с запасами 46 тыс. тонн при среднем содержании урана 0.15%. Ширина полосы калькрет в долине Йилирри достигает 6500 м, а форма рудных тел от небольших линз до протяженных пластов. Рудные концентрации локализованы в русловой части долины и сосредоточены в интервале глубины от 3 до 10 м (Лаверов и др., 1983). Основной материал русловой части долины состоит из аллювия, эвапоритов и калькрет. Русловой аллювий включает глинистый материал с обломками кварца и полевых шпатов. Эвапориты концентрируются в конусах выноса и в соляных озерах в виде сульфатов или хлоридов, среди которых преобладают гипс, целестин и галит.

Рудные концентрации локализованы только в калькретах, и единственный урановый минерал – карнотит ($K_2[(UO_2)_2 \cdot V_2O_8] \cdot 3H_2O$), был обнаружен в виде тонких пластинок на стенах пустот и вдоль трещин. Калькреты весьма разнообразны по тек-



Фиг. 1. Месторождение Кукинское. Геологический разрез (Машковцев и др., 2010). 1 – современные отложения; 2 – гравелиты, хлидолиты, конгломераты (K_1); 3 – конгломераты, гравелиты, песчаники (J_1); 4 – мезозойские кварцевые сиенит-порфиры; 5 – разрывные нарушения; 6 – урановорудные залежи.

стуре и цвету (Лаверов и др., 1983). Наиболее распространены плотные белые, фарфоровидные и кавернозные калькреты. В верхнем переходном слое чаще встречаются желваковые калькреты, состоящие из комочков с карбонатной оболочкой. В нижнем переходном слое снижается содержание карбонатов, а количество глинистого материала и кварца превышает 10%. Во всех типах калькрет имеются остатки красно-бурых или коричневых суглинков, замещенных в разной степени карбонатом. Калькреты залегают на глинах с обломками кварца мощностью до 25 м. В свою очередь, слой долинных глин лежит на архейском гранитогнейсовом фундаменте, пересеченном поясами зеленокаменных пород, с возрастом гранитов 2600 млн лет.

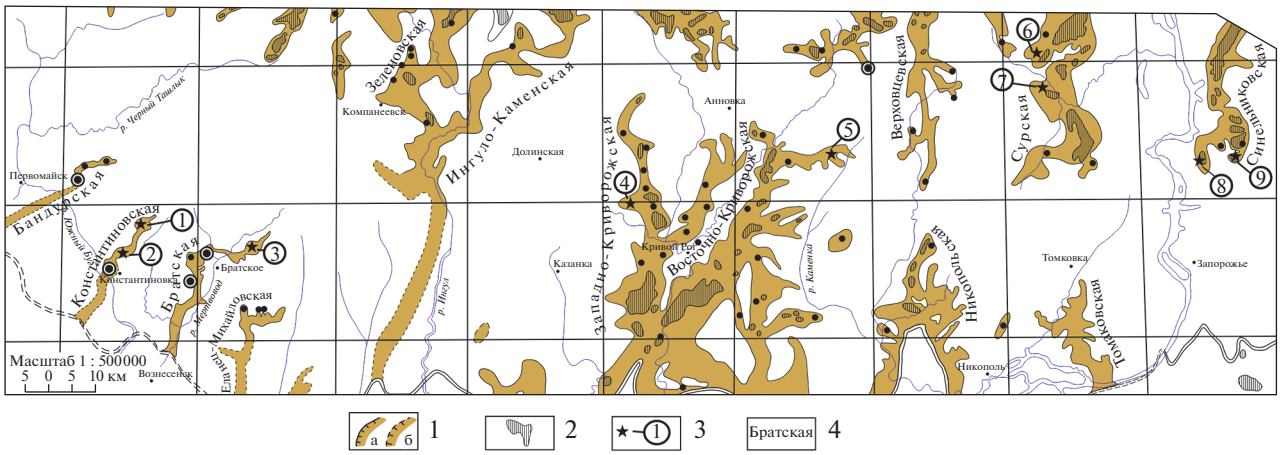
Несомненным является образование карнотитовых руд в калькретах в аридных условиях при высокой степени испарения (до 2500 мм в год) и среднем количестве дождевых осадков до 200 мм в год. При этом большая часть их приходится на время интенсивных дождей и тропических циклонов, когда возникают временные потоки. Образование рудных тел происходит на фоне интенсивных испарительных процессов, продолжающихся в настоящее время. Грунтовые воды циркулируют от уступов архейского фундамента в русло долины, заполненное калькретами, которые являются основным рудоносным горизонтом. Австралийские геологи предполагают, что формирование руд происходило на испарительном барьере в калькретах и источником урана могли служить граниты, а ванадия – зеленокаменные породы (Лаверов и др., 1983).

К инфильтрационно-окислительному типу также относится слюдковое месторождение Кукинское, находящееся в иных условиях, которое располагается в северо-западном борту Ингодинской впадины (Машковцев и др., 2010). Урановые руды при средней мощности 6.45 м и содержании 0.047% локализованы преимущественно в гравелитах одноименной свиты (J_3) общей мощностью около 70 м. Выявлено два рудных тела на глубинах 5–15 и 10–40 м с общими запасами около 500 т (фиг. 1). Из урановых минералов установлен только отенит – $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10–12H_2O$. Околорудные изменения выражены окварцеванием, флюоритизацией и каолинитизацией отложений кукинской свиты и сиенит-порфиров фундамента. Элементами-спутниками урана в рудах являются мышьяк, молибден и цинк. По мнению геологов Сосновского ПГО, в формировании Кукинского месторождения основную роль играли обогащенные ураном инфильтрационные воды, которые вблизи уровня грунтовых вод откладывали слюдковую минерализацию. К этому типу, вероятно, относятся все мелкие до средних месторождения урана со слюдковой минерализацией в зонах окисления, контролируемые вертикальной зональностью (Машковцев и др., 2010).

2 тип. Инфильтрационно-восстановительный

Этот тип представлен девятью мелкими промышленными месторождениями с запасами до 1.5 тыс. т урана каждое в углистых среднеэоценовых отложениях бучакского яруса Украинского щита (фиг. 2). С 1965 по 1970 гг. автор принимал участие в детальном изучении пяти месторождений – Садовое, Ташлыкское, Братское, Сурское и Червоноярское. Наиболее полный объем детальных исследований был проведен на Братском урановом месторождении, где, помимо обычного комплекса работ, было выполнено микробиологическое изучение проб пород и урановых руд, их изотопных свойств, а также экспериментальное моделирование эпигенетических процессов рудообразования (Винокуров и др., 1970–1973).

В основании этого месторождения залегают ураноносные углистые осадки среднего эоцена мощностью до 20–30 м. Они перекрываются верхнеэоценовыми отложениями киевского яруса – кварц-глауконитовыми песками и глинами мощностью до 35 м. Выше их залегает пачка мелко- и



Фиг. 2. Схема ураноносности среднеэоценовых угленосных отложений Украинского щита (Винокуров, 1970). 1 – контуры палеодепрессий, выполненных континентальными угленосными отложениями среднего эоцена: а – установленные и б – предполагаемые; 2 – буроугольные залежи; 3 – месторождения урана в углистых отложениях среднего эоцена: Садовое – (1); Ташлыкское – (2); Братское – (3), Христофоровское – (4), Девладовское – (5), Сурское – (6), Червоноярское – (7), Петро-Михайловское – (8), Первозвановское – (9); 4 – названия палеодепрессий: Братская и др.

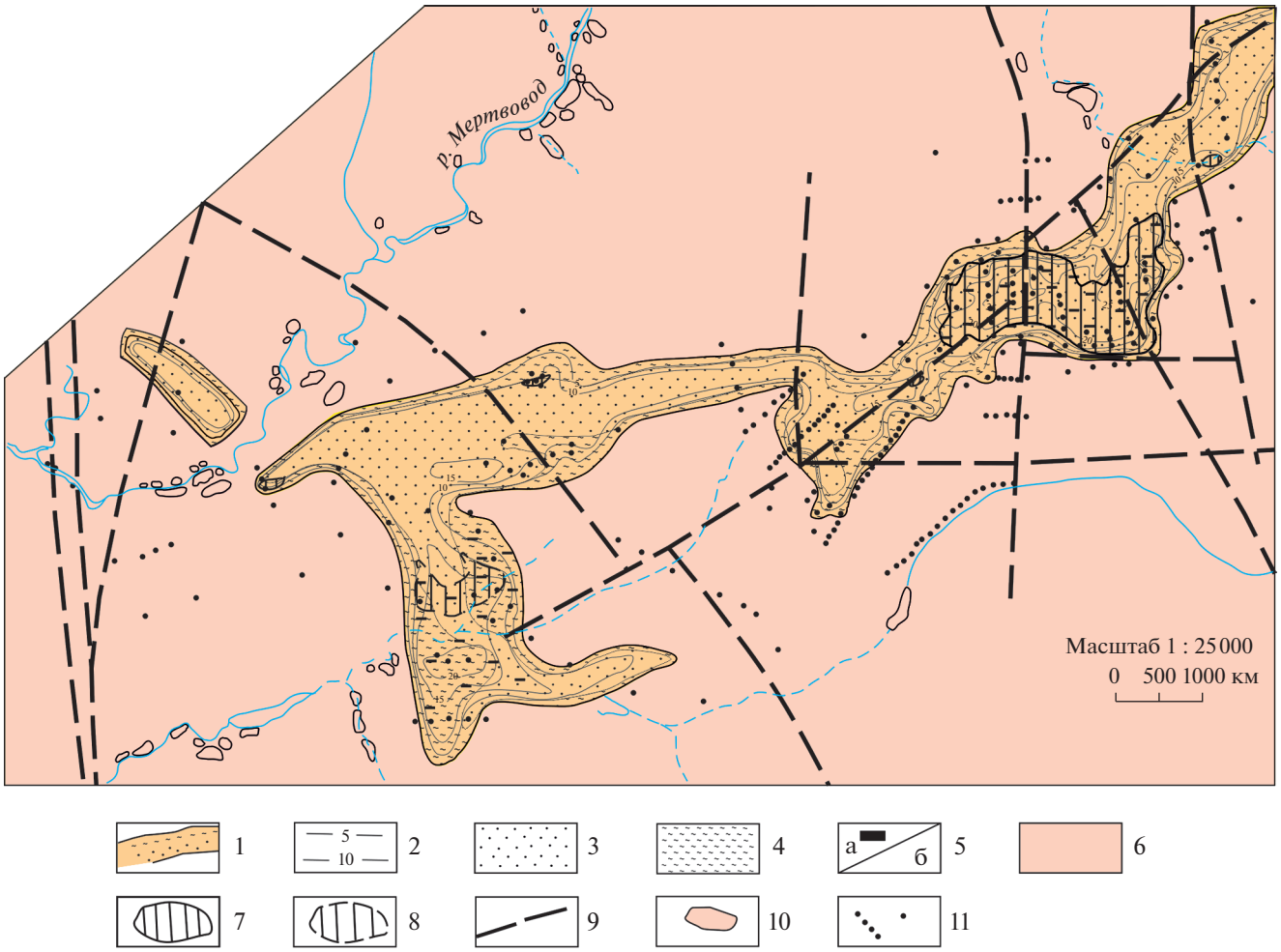
среднезернистых глинистых песков харьковского яруса олигоцена мощностью до 15 м. Завершается разрез четвертичными красно-бурыми глинами мощностью от 2 до 15 м. Осадконакопление протекало в узких палеодепрессиях с глубиной вреза до 30 м, протяженностью до 50 км и шириной 0.5–1.5 км, в редких случаях 3–4 км (фиг. 3). Ураноносный комплекс представлен песчано-глинистыми отложениями с маломощными прослоями бурых углей и широким развитием русловых фаций, которые постепенно переходят в песчано-глинистые или углисто-глинистые осадки (фиг. 4). Типичной их особенностью является крайне неравномерное распределение углистого материала от отсутствия до полного насыщения осадков.

Месторождение имеет местный источник урана и элементов-спутников в виде пегматоидных гранитов. Так, в Западном разломе Братского месторождения выявлена меридиональная ураноносная зона протяженностью 2.5 км при ширине до 300 м с содержаниями урана от 0.01 до 0.06% в розово-красных гранитах на глубинах от 77 до 285 м, в которой установлена уранинитовая и черниевая минерализация (фиг. 4).

На месторождении установлены два водоносных горизонта: в трещиноватых протерозойских породах и в отложениях бучакского яруса, которые разделены глинистыми образованиями коры выветривания. В участках отсутствия и малых мощностей последней предполагается активная связь водоносных горизонтов, что подтверждается близкими статическими уровнями и химическим составом подземных вод. Первый из них имеет направление движения подземных вод с северо-востока на юго-запад и дренируется глубоко врезанной долиной реки Мертвовод (фиг. 3). Для него характерен хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатный состав вод с общей минерализацией до 3.4 г/л, величинами pH 7.3–7.7 и содержаниями урана 1.3–12.0 × 10^{-6} г/л. Распространение второго горизонта ограничено контурами палеодепрессии, и для него типичен аналогичный состав с минерализацией 0.9–1.8 г/л и pH 6.9–8.3. Содержание урана изменялось на месторождении от северо-восточного и центрального до западного участка с 2.3–97.0 до 0.6–1.3 × 10^{-6} г/л.

Эпигенетическая зональность включает пять зон: полного и частичного окисления, сульфидного обогащения, урановых руд и неизмененных пород. Окисленные породы имеют простой минеральный состав и сложены кварцем и каолинитом, которые в разной степени пропитаны гидроксидами железа (гидрогетит, гетит). В пятнисто окисленных разностях пород иногда наблюдается довольно значительное количество углистого материала и полуокисленных сульфидов железа. Гидрогетит является наиболее распространенным минералом и встречается в измененных отложениях в виде землистой цементирующей массы желтого и желто-бурого цвета.

Зоны сульфидного обогащения выделяются в виде участков, в которых сульфиды составляют от 5 до 50–70% объема пород в слабо углистых песках. Сульфиды обычно наблюдаются в виде основной цементирующей массы, превращаясь в массивные песчаники, мощность которых обычно составляет от 2–5 до 10–20 см, но иногда достигает 0.5 м. В глинисто-углистых породах они создают мелкую вкрапленность, тонкие прожилки, порошковатые налеты, стяжения и желваки разной величины. Выявлена следующая последовательность выделения эпигенетических суль-



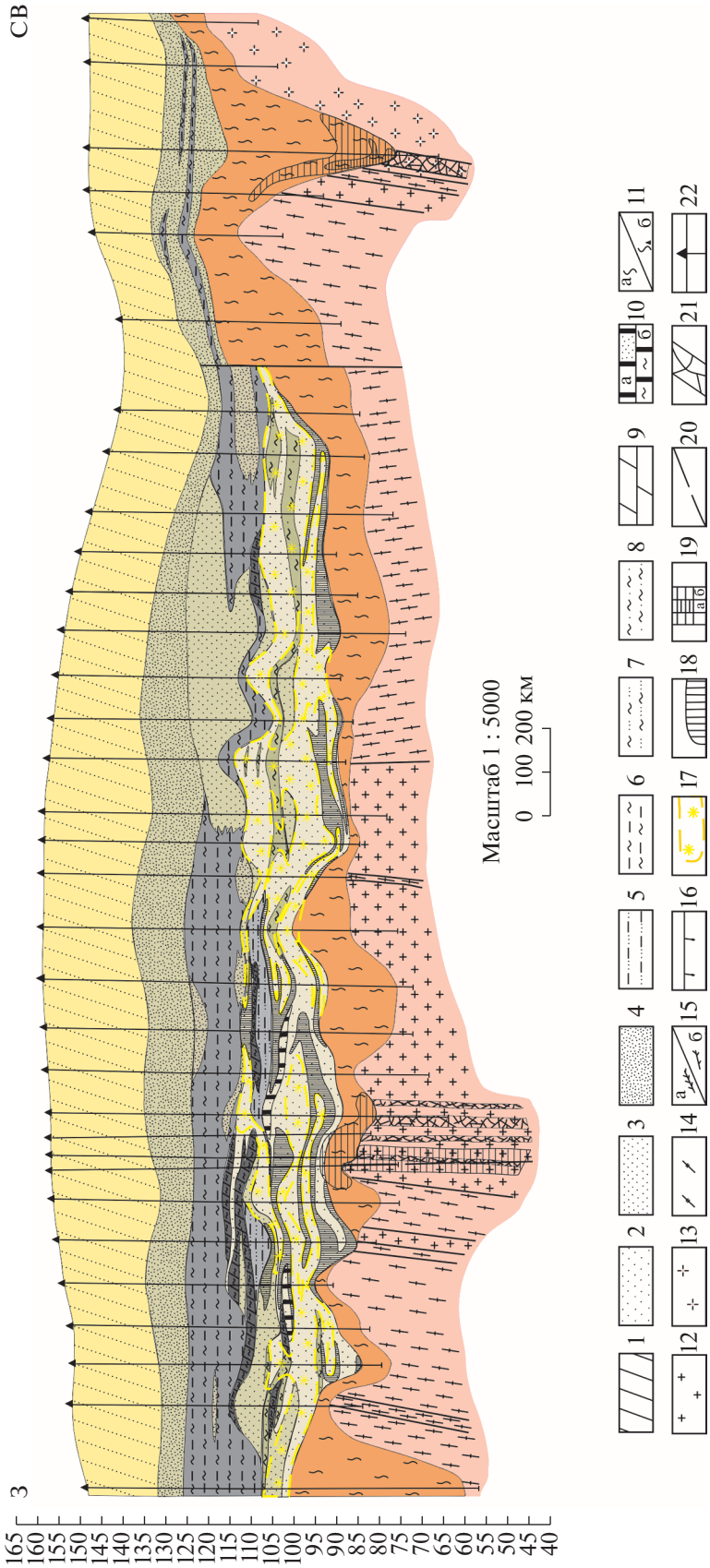
Фиг. 3. Геологическая карта района Братского месторождения со снятым чехлом верхнеэоцен-четвертичных отложений (Винокуров, 1970). 1 – современные площади распространения отложений среднего эоцена; 2 – изопахиты среднеэоценовых отложений; 3–5 – области преимущественного развития в разрезе среднеэоценовых отложений: 3 – русловых разнозернистых и гравийных песков, 4 – пойменных глинистых и алевритоглинистых осадков, 5 – углистых (а) и безуглистых (б) осадков; 6 – породы докембрийского фундамента: граниты, мигматиты, гнейсы; 7 – рудные залежи Братского месторождения; 8 – аномальные концентрации урана; 9 – тектонические нарушения, выделенные по комплексу геолого-геофизических данных; 10 – обнажения докембрийских пород; 11 – поисковые скважины.

фидов (от ранних к поздним минералам): марказит → бравоит, виоларит, иордизит, сфалерит, пирит → сажистый пирит.

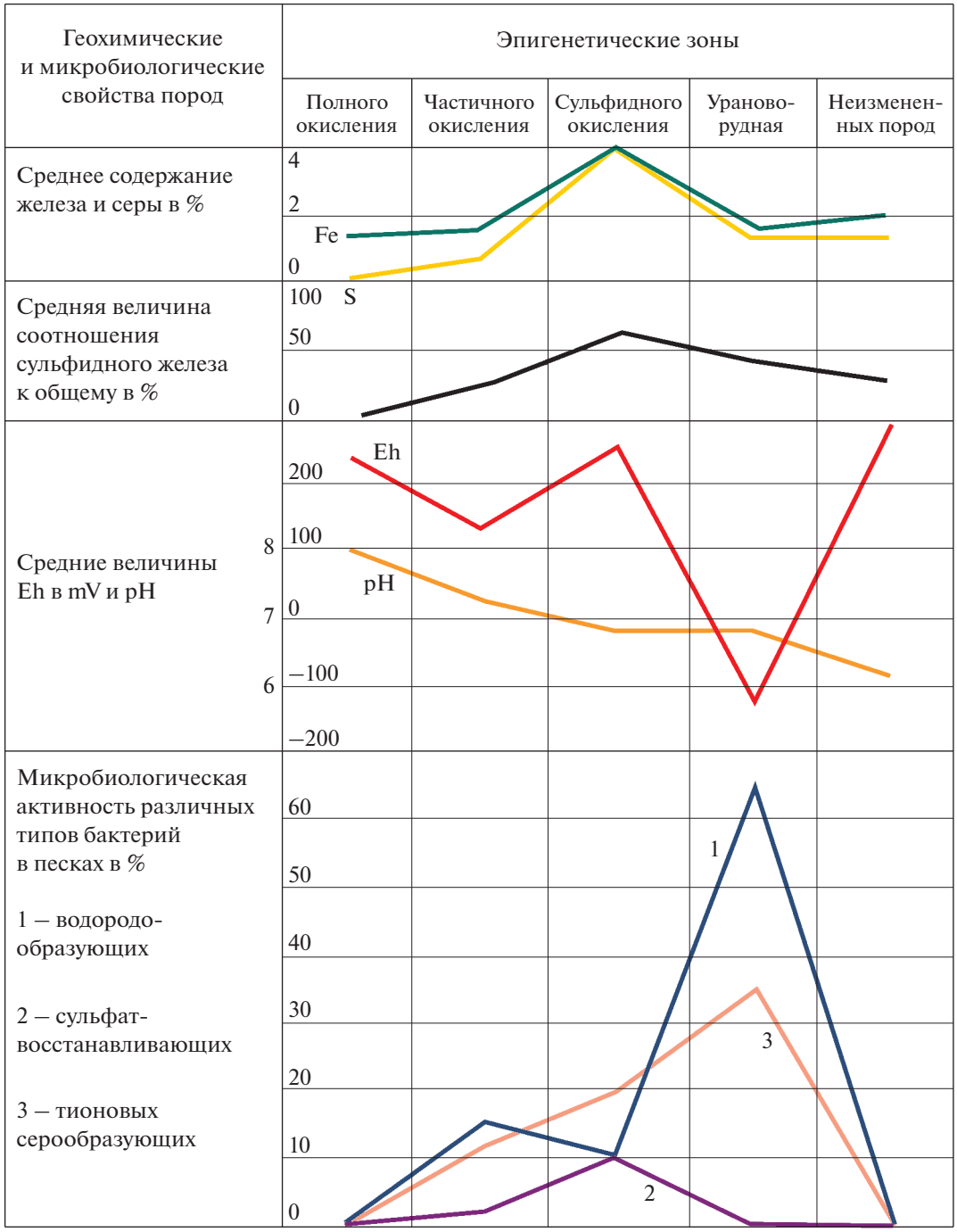
Урановые руды имеют мощность от 0.5 до 12 м и локализованы преимущественно в углистых песках (65%), а также в углистых глинах (20%) и углях (15%). Содержание урана в рудах изменяется в целом от 0.01 до 0.5%. Основная часть урана приурочена к углистому (более 35%) и глинистому (около 25%) веществу, а на долю урановых черней приходится около 20% общего урана. Величина радиоактивного равновесия (Kpp) в урановых рудах изменяется от 20 до 650%. При этом избыток урана обычно характерен для средних частей рудных залежей, а избыток радия – для краевых.

Элементами-спутниками урана являются: Mo (64), Ni (37), Co (0.36), Zn (0.32), а также Tl. В скобках приведены коэффициенты парной корреляции с ураном в %. Для них типично образование самостоятельных минералов: йордизит – колломорфная разновидность молибденита (MoS_2), бравоит $(Fe,Ni)S_2$ и виоларит (NiS_2). При этом Tl является наиболее ярким показателем эпигенетической природы пирита, т.к. содержание его резко увеличивается до 300 г/т, т.е. на 1.5 порядка в участках непосредственного контакта зоны окисленных пород (Винокуров, Воскресенская, 1971).

Выявлено полное соответствие микробиологической и эпигенетической минералого-геохимической зональностей. Группа тионовых бактерий развита преимущественно в зонах пластового окисления. Причем железоокисляющие бактерии



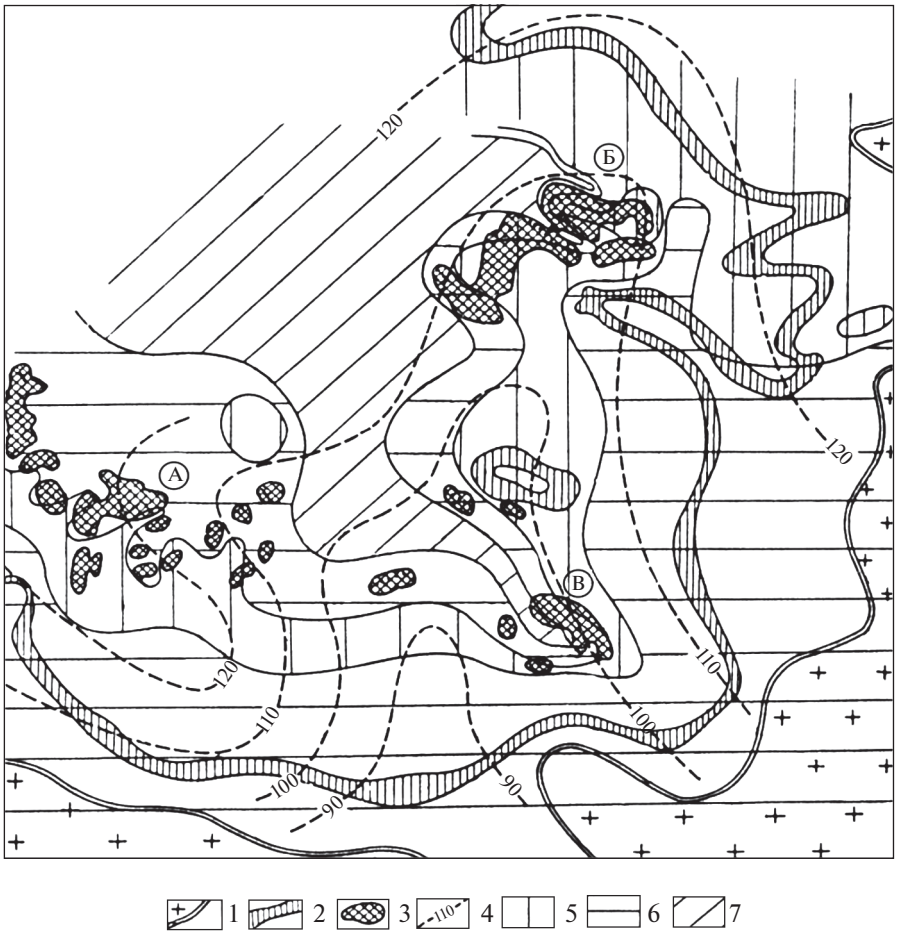
Фиг. 4. Продольный геологический разрез (Винокуров, 1970). 1 – неоген-четвертичные лессовидные суглинки и супеси, галька, щебенка и валуны; пески (2–4): 2 – крупнозернистые до гравийных, 3 – среднезернистые, 4 – мелкозернистые; алевриты (5–6): 5 – песчанистые, 6 – глинистые; глины (7–8): 7 – песчанистые, 8 – алевролитовые; 9 – мергели; 10 – угли бурые: а – песчанистые; 6 – глинистые; 11 – кора выветривания: а – глинистая, 6 – глинисто-щебенистая; 12 – граниты; 13 – граниты пегматоидные; 14 – мигматиты, гнейсы; 15 – углефицированные растительные остатки (а) и детрит (6); 16 – углефицированные корни растений; 17 – зоны пластового окисления в угленосных отложениях бучакского яруса; 18 – рудные залежи бучакского яруса и верхней части коры выветривания; 19 – контуры аномальных активностей в коре выветривания и в докембрийских породах по данным гамма-каротажа: а – от 50 до 100 мкр/час, и 6 – свыше 100 мкр/час; 20 – тектонические нарушения; 21 – зоны интенсивной трещиноватости в докембрийских породах; 22 – скважины и их номера.



Фиг. 5. Био- и геохимическая характеристика эпигенетической зональности (Винокуров, 1970).

(*Th. ferrooxidan*) определены только в пробах из окисленных пород. Серообразующие (*Th. thioparus*) со значительной микробиологической активностью наиболее широко развиты в зонах частичного окисления и сульфидного обогащения (Винокуров, 1970). Сульфатвосстанавливающие бактерии имели равную величину микробиологической активности в зонах сульфидного обогащения и урановых руд. Водородообразующие бактерии развиты шире и более интенсивно, но явный максимум их микробиологической активности установлен в рудной зоне (фиг. 5).

Образование урановых руд происходило во временном диапазоне от 2 млн лет до современного, судя по данным исследованиям соотношения изотопов ^{238}U, ^{234}U и иония ^{230}Th, и связано с



Фиг. 6. Карта Маришского рудного поля (с дополнениями авторов по материалам Михайлов и др., 1987). 1 – области поднятия гранитоидных пород; 2 – выходы нижнего туфового горизонта под неогеновые отложения; 3 – рудные залежи в туфах (месторождения "А" – Марица и "Б" – Навысен) и в проницаемых туфогенно-терригенных породах (месторождение "В" – Троян); 4 – пьезоизогипсы; 5–7 – содержание урана в водах (г/л): 5 – (10–50) × 10^{-6}, 6 – (1–10) × × 10^{-6}, 7 – менее 1 × 10^{-6}.

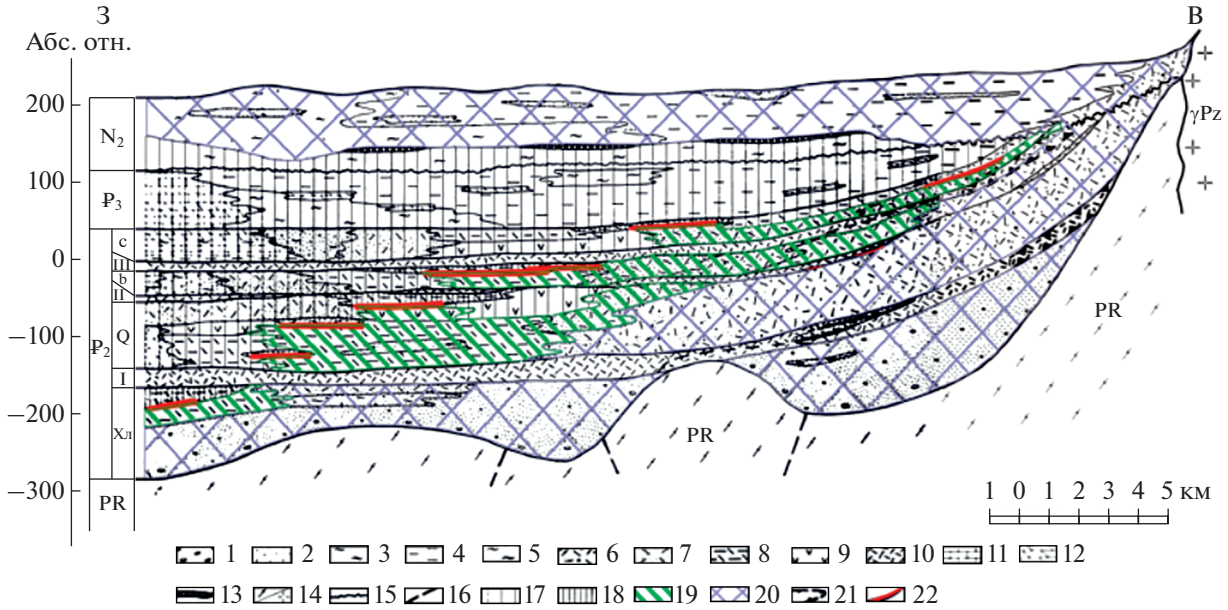
периодом неотектонической активизации Украинского щита. Эти палеодолинные урановые месторождения представляют собой пример экзогенной инфильтрационной концентрации урана с формированием промышленного оруденения из грунтово-пластовых вод без участия других процессов. Об этом свидетельствует отсутствие иных эпигенетических новообразований (карбонатных, кремнистых и др.) помимо гидроксидов, сульфидов железа и продуктов окисления (фюзенизации) углистого вещества без признаков его растворения и переноса.

К этому типу относятся месторождения урана Пригородное и Смоленское в неогеновых отложениях Северного Алтая, Санарское и Борисовское в четвертичных осадках Южного Урала, Торфяное в палеогеновых отложениях Северного Казахстана, а также, вероятно, некоторые объекты в кайнозойских аллювиальных осадках Вайоминг в Северной Америке (Fischer, 1970, Reynold et al., 1978; Халезов и др., 2009; Машковцев и др., 2010).

3 тип. Эксфильтрационно-восстановительный

В этот тип выделены урановые месторождения, связанные с позднекайнозойской тектономагматической активизацией, которые значительно распространены в районе Родопского свода и приурочены к впадинам, выполненным туфогенно-осадочными отложениями (Марица, Навысен, Елешница и др.) Наиболее детально и комплексно изучено Маришское рудное поле, включающее три аналогичных месторождения – Марица, Навысен и Троян (фиг. 6), которое подробно рассмотрено в статье (Винокуров, Стрелкова, 2016).

Это рудное поле расположено в краевой части одноименной впадины, которая выполнена вулканогенно-осадочными отложениями верхнего



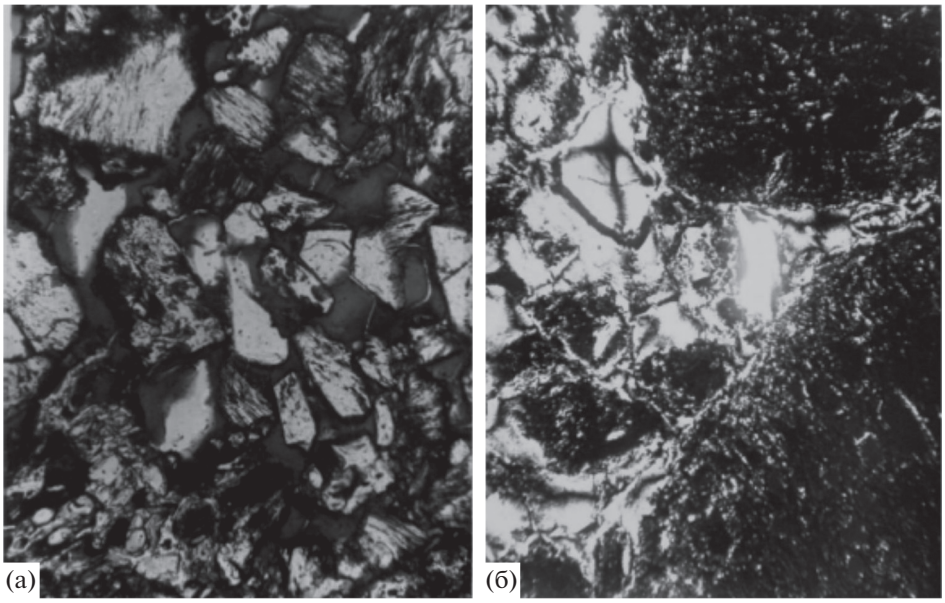
Фиг. 7. Геологический разрез (с дополнениями авторов по материалам Михайлов и др, 1987). 1 – конгломераты, гравелиты, песчаники; 2 – пески, песчаники с примесью гравия; 3 – песчаники глинистые; 4 – алевролиты; 5 – глины; 6 – туфогравелиты; 7 – туфопесчаники; 8 – туфоалевролиты; 9 – туффиты; 10 – туфы; 11 – известняки; 12 – мергели; 13 – бурые угли; 14 – гнейсы и гранитогнейсы нижнего структурного этажа; 15 – границы преднеогенового размыва; 16 – разломы; 17–20 – окраска пород: 17 – серая, 18 – темно-серая, 19 – зеленоцветная, 20 – пестроцветная; 21 – граница выклинивания пластовой лимонитизации; 22 – урановые рудные тела.

эоцена–олигоцена и перекрывающими их осадками неогена. Продуктивная толща залегает моноклинально, и в рудном поле ее мощность 120–220 м. В основании ее лежат пролювиальные осадки: пестроцветные конгломераты, гравелиты и грубозернистые песчаники. Их перекрывают терригенно-пирокластические отложения опресненной лагуны, представленные чередованием трех пластов проницаемых риолитовых и риодацитовых туфов с туфоалевролитами, туфопесчаниками и туффитами промежуточных пачек a, b и c (фиг. 7). Туфовые горизонты имеют мощность от 0.5 до 15.0 м, а промежуточные пачки от 5–7 до 35–40 м. Верхнеэоценовые породы согласно перекрыты мелководными морскими отложениями олигоцена: глины, известняки, мергели с прослоями туффитов. На них согласно залегают озерные угленосные отложения позднего олигоцен–миоцена, представленные серыми и зелеными глинами и углями. Выше с размывом и угловым несогласием лежат красноцветные алевролиты, глины и песчаники плиоцена (фиг. 7).

Специфической чертой изученных туфогено-осадочных пород за пределами рудных контуров является их общая относительная обогащенность ураном, который можно рассматривать в качестве местного источника. Среднее содержание урана в туфах составляет 10–30 г/т, в туффитах, туфоалевролитах и туфопесчаниках содержания колеблются от 6 до 30 г/т. Минимальные количества урана 2–4 г/т характерны для пестроцветных терригенных пород, почти не содержащих пирокластического материала (Зеленова и др., 1985).

Подземные воды рудовмещающей толщи имеют гидрокарбонатно-сульфатно-натриевый состав с минерализацией 2.7 г/л, pH 7.4–8.9 и отличаются резко повышенными концентрациями кремнекислоты (6.5–13.8) × 10^{-5} г/л и фтора (6–12) × 10^{-6} г/л. В подземных водах месторождения Марица установлены аномальные концентрации гелия. Участок аномальных концентраций гелия и фтора отличается также повышенной температурой (до 30°C) самоизливающихся вод, которые указывают на разгрузку в пределах рудного поля глубинных вод.

Среди эпигенетических изменений рудовмещающих пород наиболее проявлена монтмориллонитизация, а также отмечались новообразования цеолитов, каолинизация и лимонитизация. Монтмориллонитизация развита в разрезе широко, особенно сильно затронуты туфы, где монтмориллонит выделялся в виде прожилков, выполнял гнезда и иногда целиком замещал цемент (фиг. 8). В туффитах и туфопесчаниках крупные включения монтмориллонита встречались реже, но под микроскопом видны его выделения по порам и в цементе. Следует отметить, что за пределами эпигенетической зоны пепловый материал не претерпевает изменений (Зеленова и др., 1985).



Фиг. 8. Туф витрокластический с монтмориллонитовым цементом (а) и монтмориллонитовый прожилок в нем со сферолитовым строением (б). Прозр. шлиф, ув. 63 и 125 (по материалам О.И. Зеленовой).

Рудные тела локализованы в туфах, туфоалевритах и туфопесчаниках, но основная их часть приурочена к туфовым горизонтам. Локализации урановых руд главным образом контролируется границей сероцветных и зеленоцветных пород (фиг. 7). Рудные залежи в плане имеют полосовидную форму протяженностью до 1000 м при ширине 100–240 м, а в разрезе образуют удлиненные линзы мощностью 1–4 м, редко до 10 м. В них доминируют бедные и убогие руды со средним содержанием урана 0.017–0.080%. В наиболее обогащенных ураном пробах вблизи границ сероцветных и зеленоцветных пород Kpp понижен до 45–50% при среднем его значении в рудах около 80%.

В качестве единственного уранового минерала был определен железосодержащий нингиоит $(U,Ca,Ce)_2(PO_4)_2 \cdot 1–2H_2O$). По опубликованным данным (Белова и др., 1978), кристаллы нингиоита отличались более прямолинейными формами и общей удлиненностью. Среди характерных свойств отмечены, с одной стороны, отсутствие ассоциации его с пиритом и другими сульфидами, а с другой стороны – тесное срастание с шаровидными выделениями без микродифракционных картин и имеющими состав цинкита (ZnO) и глинозема (Al_2O_3) по данным микрозондового анализа.

Анализ данных по полному химическому анализу измененных (зеленоцветных) и неизмененных (сероцветных) туфов показал, что сильно эпигенетически измененные зеленоцветные разности отличаются от неизмененных, с одной стороны, очень значительным (более чем трехкратным) избытком окиси магния и железа, значительным (более 50%) избытком воды, окисей фосфора, кальция и алюминия, а с другой стороны – существенным (более 50%) недостатком окисей натрия, калия и заметным – марганца и кремния (фиг. 9).

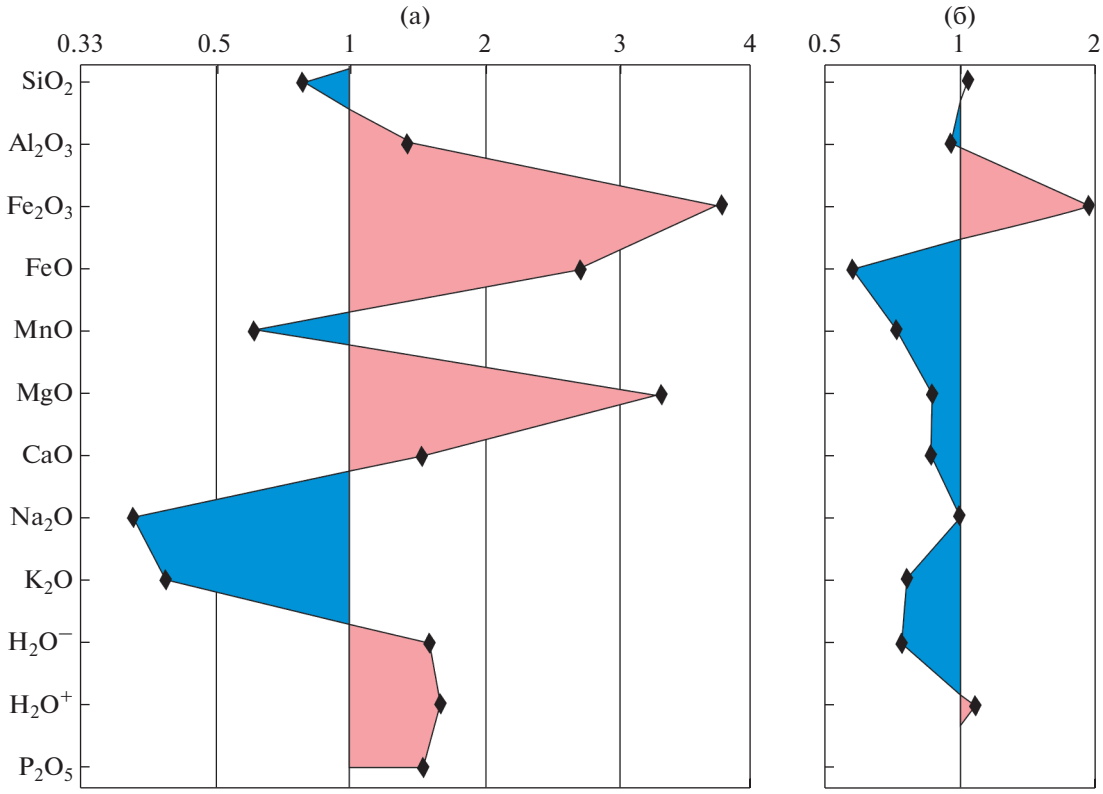
По нашему мнению, образование урановых месторождений в верхнеэоцен–олигоценовых туфогенногенно-осадочных впадинах Болгарии представляется в виде генетической модели, включающей нижеследующие обязательные условия:

– накопление толщи туфогенных осадков кислого состава с повышенным содержанием урана, которые послужили источником для формирования промышленного оруденения;

– эксфильтрационный этап, связанный с мощным потоком восходящих гидротермальных магний-кальциево-сульфатных растворов поствулканического происхождения, которые при смешении с пластовыми водами туфогенно-осадочных отложений образовывали специфичные термальные слабокислые сульфатные воды с повышенными концентрациями Mg, Ca, Fe и P;

– значительный объем метасоматически измененных зеленоцветных (монтмориллонитизированных) пород, образование которых было обусловлено воздействием эксфильтрационных термальных растворов;

– развитие ураноносных эксфильтрационных вод за счет выноса урана из эпигенетически измененных туфов, которые отлагали бедные урановые руды с нингиоитовой минерализацией на концентрационном геохимическом барьере.



Фиг. 9. Графики изменения средних содержаний основных компонентов в измененных породах: а – монтмориллонитизированных и б – лимонитизированных, по отношению к неизмененным (Винокуров, Стрелкова, 2016).

Рассматриваемые урановые месторождения Болгарии выделены в особый эксфильтрационный тип класса гидрогенных месторождений урана. К этому типу, наиболее вероятно, относятся урановое месторождение Факили в олигоценовых вулканогенных отложениях Турции, а также низкосортные урановые месторождения в четвертичных туфах провинции Лацио (Италия), расположенные в 50 км северо-восточнее г. Рима (Тедеско, 1988).

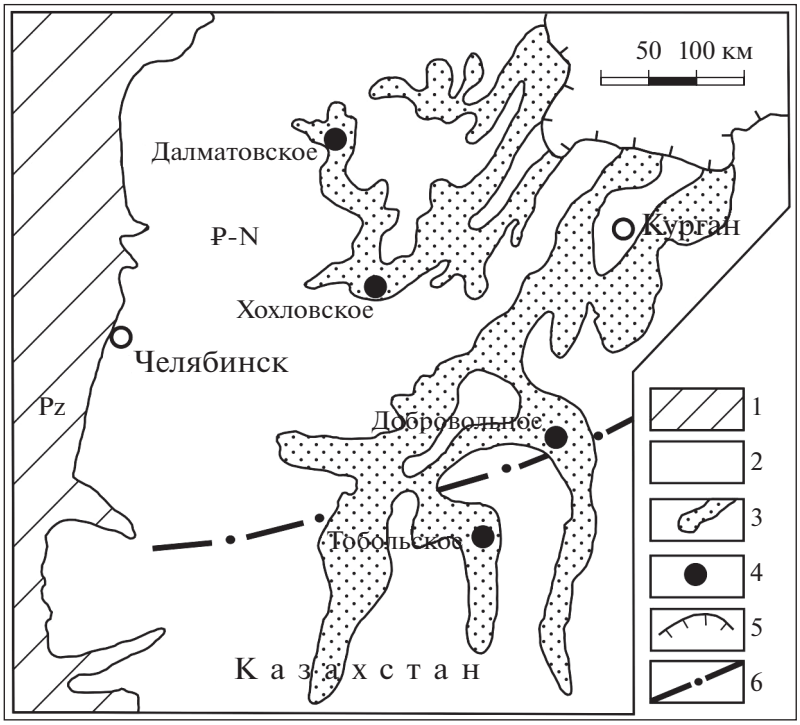
4 тип. Полигенный инфильтрационно-эксфильтрационный

Этот тип рассмотрен на примере Хохловского месторождения, входящего в состав Западно-Сибирского урановорудного региона наряду с Далматовским и другими (фиг. 10). Это месторождение отличается наибольшей изученностью в этом районе, т.к. на нем проведены детальные исследования флюидных включений, анализ изотопных отношений $^{238}U/^{234}U$ и $^{234}U/^{230}Th$, математическое моделирование теплопереноса (Винокуров и др., 2013).

Урановые руды приурочены к аллювиальным осадкам таборинской свиты ($J_{2-3}tb$), которые залегают на глубине 500–600 м. Рудовмещающие отложения состоят из двух ритмов. Первый ритм, залегающий с размывом на породах палеозойского фундамента, сложен гравийно-галечными и песчаными осадками мощностью до 20–30 м в нижней части ритма, а в верхней части – сероцветными алевролитами и глинами мощностью от 2–3 до 30 метров. Второй ритм имеет более сложное строение: нижняя часть его сложена преимущественно песками различной зернистости с многочисленными прослоями алевролитов и глин, часто обогащенных органическим веществом, общей мощностью 15–20 м, а верхняя часть представлена пластом алевролито-глинистых лигнитоносных отложений.

В качестве местных источников урана и элементов-спутников рассматриваются палеозойские граниты, но детально этот вопрос не изучен. Следует отметить, что на других месторождениях этого типа, в частности, на Семизбайском, в качестве таковых принимаются зоны гидротермальных изменений в гранитах с аномальными содержаниями урана.

Пластовые воды рудоносного горизонта являются аномальными по температуре (24.3–25°C), слабокислыми (pH = 5.9–6.2), с колебанием величин Eh от +150 mB до –40 mB, углекислыми



Фиг. 10. Зауральский ураноносный район (Халезов, 2009). Схема размещения месторождений и позднеюрских палеодолин. 1 – палеозойские породы складчатого Урала; 2 – породы осадочного чехла палеоген-неогенового возраста Западно-Сибирской плиты; 3 – речные долины средне-позднеюрского возраста, врезанные в складчатый фундамент и перекрытые чехлом морских и континентальных мел-палеоген-неогеновых отложений; 4 – месторождения урана; 5 – изолиния глубины залегания фундамента 800 м; 6 – государственная граница.

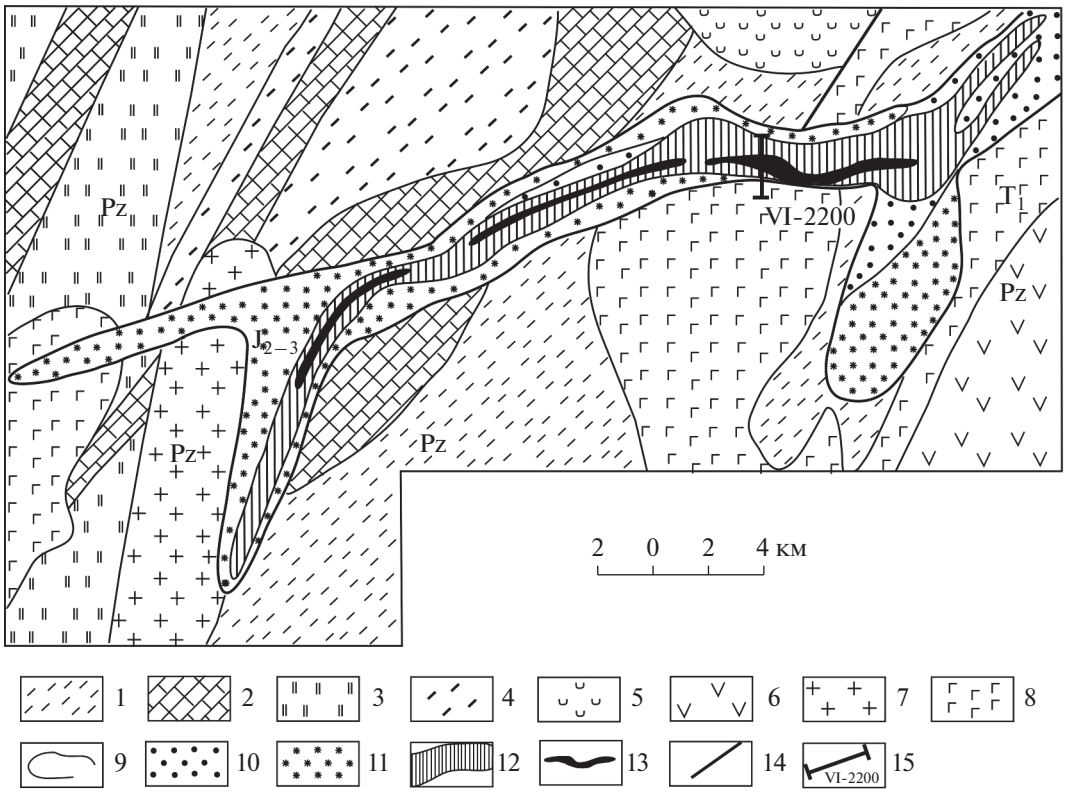
(содержание CO_2 – 2.2 г/л), карбонатно-натровыми с повышенной минерализацией 3.0–4.6 г/л.

Урановые руды прослежены на протяжении 28 км (фиг. 11). Рудные залежи имеют лентообразную форму протяженностью до первых километров при ширине до первых сотен метров. Морфология рудных тел разнообразна: от пласто- и линзовидной до ролловой. Основная часть рудных залежей залегает в песчаных отложениях второго ритма. Содержание урана в рудных телах колеблется от 0.01 до первых десятых процента, но нередко до первых процентов. Среднее содержание урана на Хохловском месторождении составляет 0.03% при средней мощности рудных тел 5.9 м (фиг. 12). Месторождения относятся к средним с запасами урана до 10 тыс. т.

Рядовые урановые руды сложены настураном (UO_2) и/или коффинитом ($U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$) при значительном развитии уран-титановой ассоциации в бедных рудах. Богатые урановые руды, обычно приуроченные к интенсивно тектонически проработанным глинам, алевролитам и глинистым песчаникам, обогащенным углеродистым веществом, имеют отличительные особенности (фиг. 13). Для них типичны крупные (первые мм) выделения настурана, сохранившие признаки затвердевшего уран-оксидного геля, высокие содержания урана (70–80%), неоднородность агрегатов и значительные повышения содержаний циркония (от 3 до 8.5%), а также присутствие в заметных количествах сульфидов, арсенидов и селенидов.

Урановые руды контролируются зонами эпигенетически измененных обеленных пород и залегают на границе их выклинивания в сероцветных породах. Рудоконтролирующая зона обеленных пород хорошо развита в отложениях нижнего и верхнего ритмов осадконакопления. В верховьях палеодолины обеленные породы захватывают всю ширину палеодепрессии, а ниже прослеживаются в виде широких лент в наиболее проницаемых осадках.

Наблюдается существенное развитие целого ряда эпигенетических минеральных новообразований, которые включают проявления сферолитового сидерита в интенсивно тектонически проработанных глинистых горизонтах, имеющих мощность до 5–7 м. Эти участки обычно совпадают с зонами осаждения гидроксидов железа. К ним также относятся специфические кремнистые новообразования в рудоносных песках и песчаниках, представляющие собой гелевидные выделения опала и/или кремнезема размером от 0.02 до 1–2 мм в межпоровом пространстве. Кроме того, эти поздние новообразования включают так-



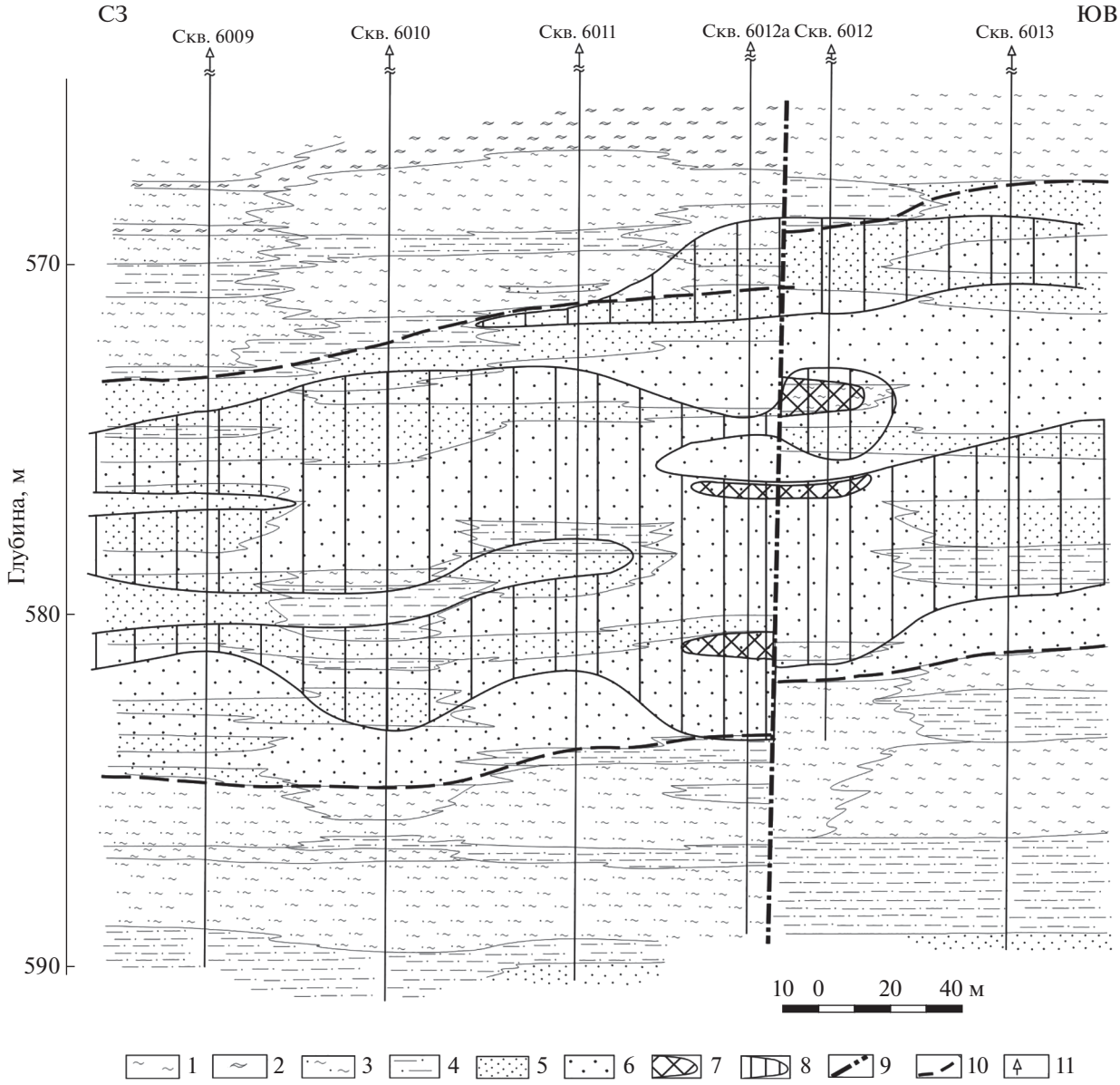
Фиг. 11. Схематическая геологическая карта досреднеюрского фундамента Хохловского месторождения (по материалам Халезов, 2009). Породы палеозойского фундамента (1–8): 1 – переслаивание аргиллитов, алевролитов, песчаников, глинистых сланцев, 2 – известняки, 3 – серицит-хлоритовые сланцы, 4 – углистые сланцы, 5 – туфопесчаники, 6 – андезиты, андезито-базальты, 7 – граниты; 8 – базальты триасового возраста; 9 – контуры средне-позднеюрской речной долины; 10 – русловые сероцветные гравелиты, песчаники, алевролиты средне-позднеюрского возраста; 11 – древняя зона грунтово-пластового окисления; 12 – контуры оруденелых пород с содержаниями урана ≥0.01%; 13 – рудные залежи; 14 – линия предполагаемого тектонического контакта; 15 – положение опорного профиля.

же чешуйчатые выделения сложного смектит-гидрослюдистого состава, развитые по тектоническим швам в глинах (фиг. 14).

Геохимические особенности включают набор элементов-спутников урана (Mo, Re, Se, As) в рядовых рудах и значительное увеличение числа сопутствующих элементов (Zr, Sc и др.) в богатых урановых рудах, а также наличие повышенных концентраций циркония в настуране. Кроме того, с точки зрения изотопной геохимии, выявлены значительные нарушения радиоактивного равновесия в ряду распада ^{238}U, ^{234}U и ^{230}Th, свидетельствующие о воздействии на урановые руды активного неотектонического процесса, наиболее вероятно, связанного с эксфильтрацией углекислых термальных вод в рудовмещающие отложения.

По нашим представлениям (Винокуров и др., 2013), образование месторождения происходило в два этапа. Первый этап – инфильтрационный, по мнению большинства исследователей. Происходило образование древних грунтово-пластовых руд, контролируемых зоной окисления, которая была уничтожена последующим процессом восстановления. Но есть одно обстоятельство: происходила инфильтрация метеорных вод, обогащенных ураном за счет местных источников, т.е. предполагаемых аномальных по урану зон в гранитах или других породах, которая предопределяла локальность развития экзогенного оруденения в пределах палеодепрессий. Об этом свидетельствуют многочисленные факты наличия местных источников для месторождений подобного типа в Северной Америке (Бойл, 1985).

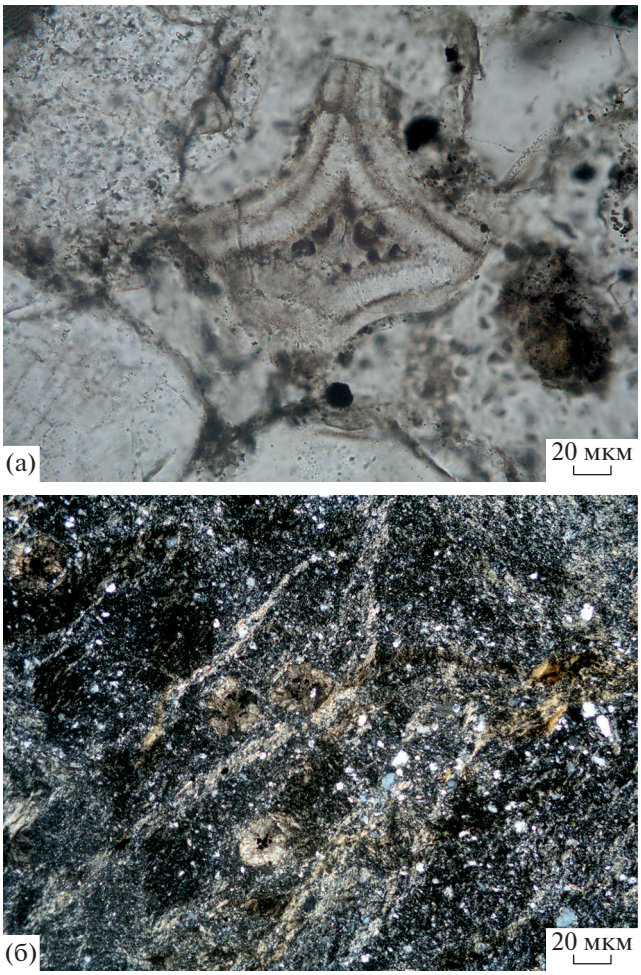
Второй этап, эксфильтрационный, связанный с неотектонической активизацией, вызвал интенсивное дробление и малоамплитудное смещение рудовмещающих пород, развитие в них термальных углекислых вод. Следствием этого явилось преобразование урановых руд (появление богатых руд с поздними сульфидами, арсенидами, селенидами металлов и многофазными гелями, обогащенных цирконием), образование железистых карбонатов и гидроксидов осаждения в измененных породах и кремнистых выделений в рудоносных песчаниках. Это обусловило еще большую локальность урановых руд. Следует отметить,



Фиг. 12. Геологический разрез по профилю VI-2200 (Винокуров и др., 2013). Литологический состав пород (1–6): 1 – глины; 2 – глины углистые; 3 – глины алевритистые; 4 – алевролиты; 5 – пески, песчаники мелкозернистые, глинистые; 6 – пески, песчаники крупно-, и разнозернистые; 7 – интервалы с богатым оруденением (содержание урана > 1% по данным опробования); 8 – контур рудных залежей с содержанием урана ≥ 0.01% (по данным γ-каротажа и опробования); 9 – тектоническое нарушение; 10 – границы второго (верхнего) рудоносного горизонта; 11 – скважины и их номера. Положение скважин 6012 и 6012а показано вне горизонтального масштаба, т.к. расстояние между ними составляет менее 5 метров.

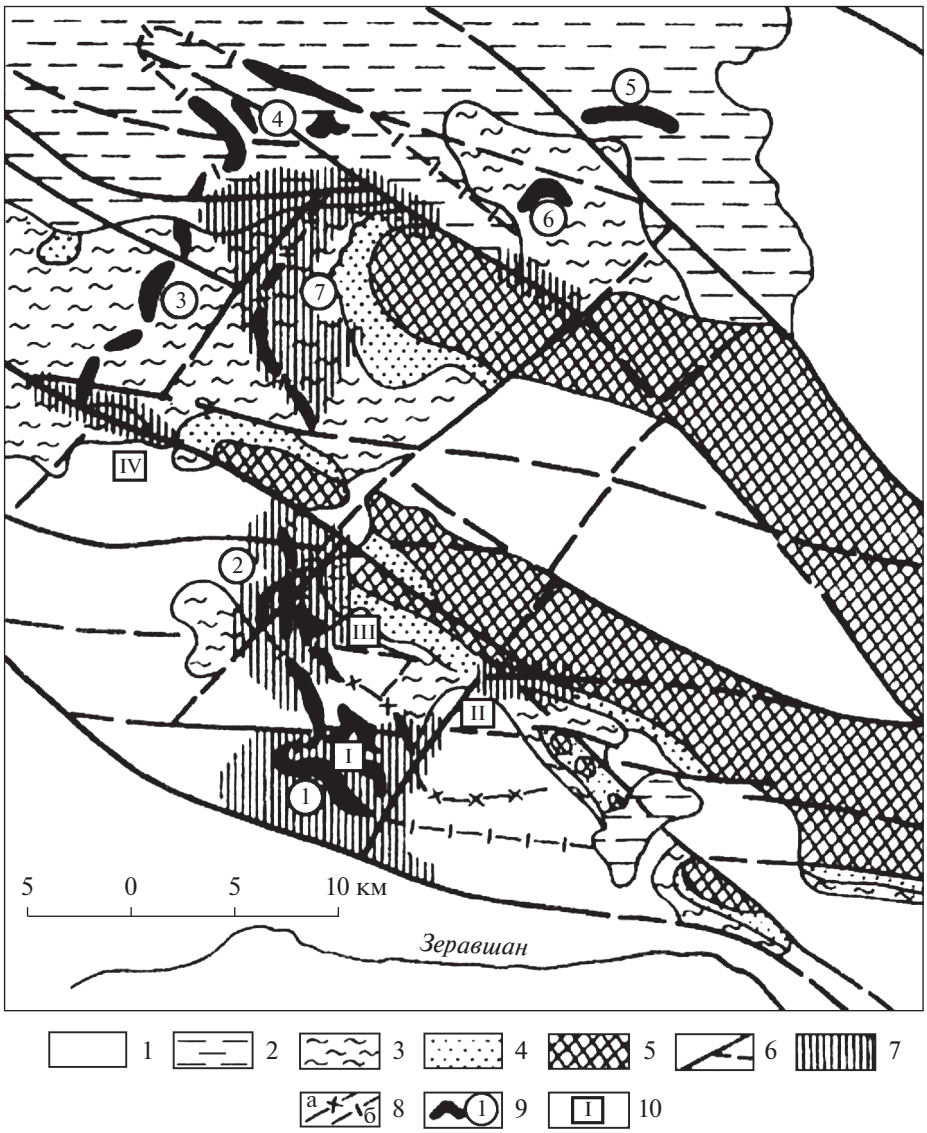
что урановые руды месторождений являются комплексными, т.к. отрабатываются способом подземного выщелачивания (ПВ). В рабочих сернокислых растворах появляются промышленные содержания РЗЭ, которые извлекаются осаждением на ионитах (Винокуров и др., 2017).

В этом типе выделяется подтип инфильтрационно-вулканогенный, который представлен месторождениями Витимского урановорудного района. Специфической чертой образования месторождений урана этого подтипа является их генетическая связь с неогеновой тектоно-магматической активизацией с мощным проявлением базальтового вулканизма, послужившего источником тепла и различных преимущественно углекислых растворов, а также основных рудных компонентов (главный минерал – нингиоит) и элементов-спутников (Ni, Co, Zn) (Коченов и др., 1990, 1997; Дойникова, 2021; Тарханова и др., 2014). К этому подтипу относятся также гидрогенные месторождения в отложениях неогена и мела, соот-



Фиг. 14. Эпигенетические минеральные новообразования (Винокуров и др., 2013). а – зональное кремнистое образование в межзерновом пространстве в светло-сером среднезернистом песке; прозрачный шлиф 2-6012а, без анализатора; б – образование сферолитового сидерита и чешуйчатых каолинит-гидрослюдистых выделений, имеющих параллельную оптическую ориентировку, по микроструктурным швам в светло-серых алевритистых глинах нижнего водоупора; прозрачно-полированный шлиф 50-6012а, с анализатором.

Фиг. 13. Центральный участок Хохловского месторождения (с дополнениями авторов по материалам ГРП № 71). 1 – номера профилей буровых скважин; 2 – поисково-разведочные скважины и их номера, в числителе – глубина залегания подошвы верхнего урановорудного горизонта (м), в знаменателе – удельная (площадная) его продуктивность по урану (кг/м^2); 3 – гидрогеологические и технологические скважины; 4 – область развития (а) и изоглубины подошвы (б) верхнего урановорудного горизонта; 5 – контуры уранового оруденения балансового (а) и забалансового (б) в верхнем водоносном горизонте; 6 – участки рудных залежей с высокой удельной продуктивностью: более 5 кг/м^2 (а) и более 8 кг/м^2 (б); 7 – предполагаемые сдвиго-сбросы.



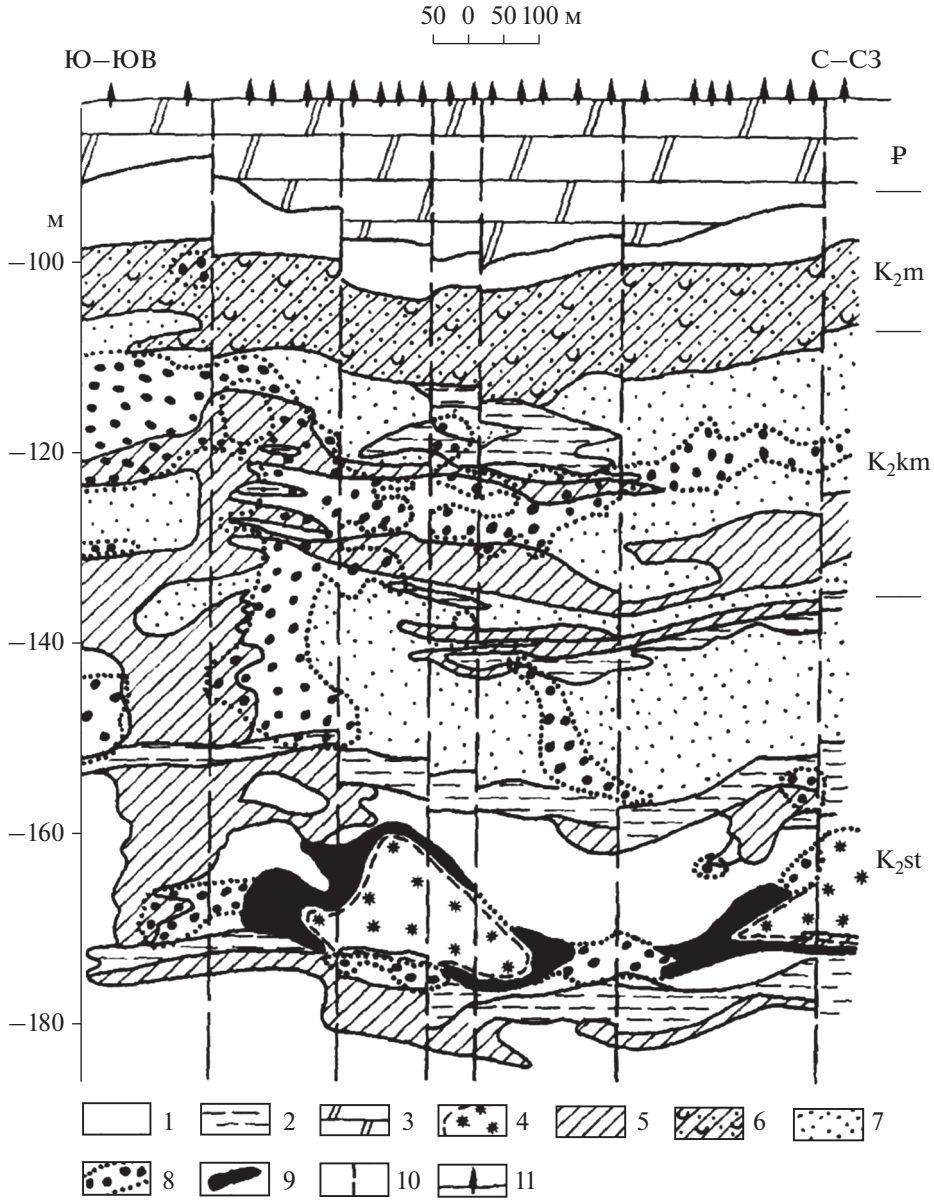
Фиг. 15. Геологическая карта Букинайского рудного поля (Винокуров и др., 1995). Отложения мезозойско-кайнозойского чехла (1–4): 1 – четвертичные пески, галечники и конгломераты, 2 – неогеновые алевролиты, глины и гравийные пески, 3 – палеогеновые глины, мергели, известняки и песчаники, 4 – верхнемеловые пески, песчаники, глины и ракушняки; 5 – породы палеозойского фундамента; 6 – разрывные нарушения; 7 – очаги проявления гидротермальных изменений пород восстановительного ряда (окварцевания, каолинизации, карбонатизации, пиритизации, битуминизации и др.); 8 – границы выклинивания зон пластового окисления в коньякских (а) и сантонских (б) отложениях; 9 – рудные залежи урановых месторождений: Кенимех (1), Южный Букинай (2), Северный Букинай (3), Аленды (4), Терекудук (5), Вараджан (6), Тохумбет (7); 10 – участки детального изучения гидротермальных изменений рудовмещающих пород: Кенимех (I), Палваната (II), Четтык (III), Кара-Сыгыр (IV).

ветственно района Нинге-Тоге (Япония) и северной части Чехии (месторождения Гамр) с площадным развитием базальтового вулканизма (Muto, 1962; Kajitani, 1970; Арапов и др., 1984).

5 тип. Полигенный (эксфильтрационно-инфильтрационный)

Этот тип составляют крупные урановые месторождения Центрально-Кызылкумской провинции, рассмотрим его на примере месторождения Кенимех Букинайского рудного поля. Последнее входит в состав Центрально-Кызылкумской провинции и включает месторождения Кенимех, Южный и Северный Букинай, Аленды, Терекудук и уран-молибденовое месторождение Вараджан на выклинивающихся зонах пластового окисления в верхнемеловых отложениях (фиг. 15).

В основании осадочного чехла лежат морские грубообломочные осадки мощностью до 20 м, на



Фиг. 16. Геологический разрез участка детализации ПВ-86 (Винокуров и др., 1995). 1 – пески; 2 – алевролиты; 3 – известняки, доломиты; 4–7 – зоны эпигенетического изменения пород: 4 – пластового окисления (лимонитизации), 5 – интенсивной карбонатизации, 6 – доломитизации ракушняков, 7 – каолинизации и монтмориллонитизации; 8 – ореолы радиоактивных аномалий с интенсивностью более 15 мкр/ч; 9 – урановые залежи; 10 – разрывные нарушения; 11 – разведочные скважины.

них залегают пепельно-серые глины мощностью 40–50 м, относимые к сеноман–турону. Выше располагаются отложения коньякского яруса мощностью 34–45 м, нижняя часть которых представлена аллювиальными сероцветными мелкозернистыми песками с линзами грубозернистых, а верхняя часть сложена темно-серыми алевролитами (Кисляков, Щеточкин, 2000; Винокуров, 2009). Осадки сантонского возраста включают мощную (до 100–120 м) сероцветную аллювиальную пачку, состоящую из песков, ритмично чередующихся с глинистыми песчаниками, алевролитами и глинами, которые являются основными рудовмещающими для месторождения Кенимех, где залегают на глубине до 1200 м (рис. 16). Отложения кампана представлены морскими кварц-глауконитовыми песками 20–40 м, а маастрихта – светло-серыми мелкозернистыми песками общей мощностью 15–25 м.

На рудовмещающих верхнемеловых отложениях с размывом залегают морские осадки палеоцен-эоценового возраста мощностью 300 м и бо-

лее, которые представлены горизонтами около 20 м брекчиевых доломитов и известняков (фиг. 16), а остальные – глинами. Перекрывающие их осадки олигоцен-миоценового возраста сложены маломощными мелкозернистыми, образованными за счет сноса материала с формирующегося Тянь-Шаня. К верхнему миоцену относятся палевые пески и гравийники, залегающие на платформенном чехле и фундаменте (Винокуров, 2009).

Рудное поле находится в Каракатинском и Кульжуктауском артезианских бассейнах, имеющих сходство. Основным является сеноман-палеоценовый водоносный комплекс (80–150 м), в котором выделяется до 8 горизонтов. Наиболее мощным представляется сенонский водоносный горизонт, по которому зона окисления заходит наиболее далеко в верхнемеловые отложения (фиг. 15). Воды сульфатно-хлоридные и натриево-кальциевые с минерализацией 2–3 г/л, питание их происходит за счет трещинно-карстовых вод глубокой циркуляции с pH = 7–8, а также грунтовыми и поверхностными потоками. В окисленных породах развиты кислородные воды с содержаниями урана и молибдена от ~10^{-6} до 1–3 × 10^{-5} г/л (Кисляков, Щеточкин, 2000).

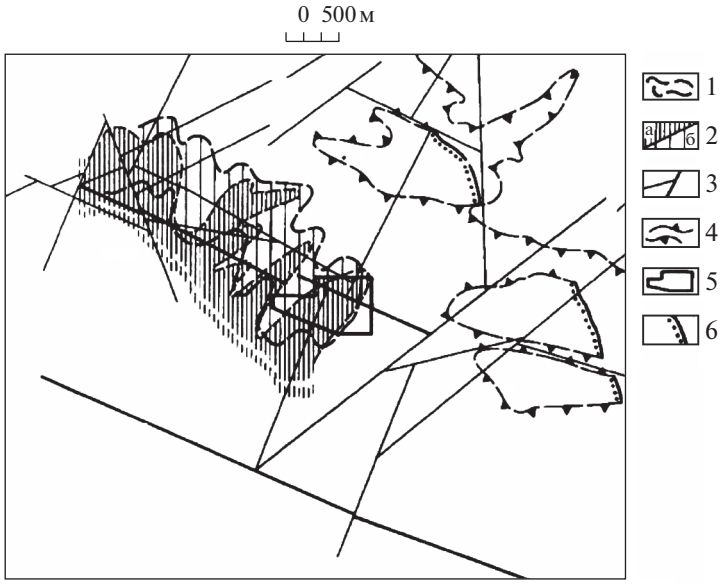
Эпигенетические изменения пород представлены новообразованиями окислительного и восстановительного рядов. Новообразования окислительного ряда выражены зонами приповерхностного и глубоко проникающего пластового окисления, которые образуют полосу измененных пород. Последние, в отличие от других типов, представлены красноцветными и желтоцветными породами, которые соответственно состоят из красных гидрогематитов на поверхности песчаных зерен и желтых, желто-бурых гидрогетитов, пседоморфно развитых по железосодержащим минералам. Первые представляют тыловые части зон пластового окисления и слагают полосы до десятков километров вблизи областей питания. Ниже по падению они сменяются бордюрами желтой лимонитизации шириной от первых сотен метров (Кенимех, Южный Букинай) до десятков километров (Северный Букинай), которые на выклинивании образуют зоны рудоносных пород (Кисляков, Щеточкин, 2000). Следует отметить, что гидрогематиты зон пластового окисления отличаются от гидротермальных аналогов своей структурой, выявленной с помощью электронной микроскопии и микрофазового анализа (Винокуров и др., 1995). Они представлены спутанно-волокнистыми комковатыми микроагрегатами.

Изменения восстановительного ряда по характеру развития, составу и последовательности образования подразделяются на три стадии, разделенные фазами дробления: 1) кислотного выщелачивания (новообразования каолинита, монтмориллонита, халцедона и других, развитые в приразломной части); 2) углекислая (или осаждения) – включает карбонаты (доломит, кальцит) и пирит, образующие базальный пойкилобластовый цемент в карбонатных столбах, имеющих мощность до десятков метров (фиг. 16); 3) углеводородная, состоит из легкого по составу маслянистого до тяжелого смолисто-асфальтенового битума, развитых как в карбонатах, так и за их пределами (Винокуров и др., 1995). На основании анализа имеющихся материалов предполагается, что каждая стадия совпадает по времени с фазой тектонической активности. Стадия кислотного выщелачивания – с позднеплиоценовой (базильбекской), углекислая – с раннечетвертичной (айтымской) и углеводородная – со среднечетвертичной, современной (надкулкудской).

Помимо основных, в ореоле кислотного выщелачивания установлены следующие минералы: фосфат (апатит), алюмофосфаты (варисцит, гойяцит), алюмосульфовосфат (сванберит), алюмосульфат (алунит), титанаты (лейкоксен, анатаз), оксидов железа и марганца (гематит, магнетит, якобсит, ферроксигит), селенистый и мышьяковистый пирит, клаусталит и самородное серебро. Большинство из них являются концентраторами урана и сопутствующих элементов во внешней зоне этого ореола, к которому приурочена обширная радиоактивная аномалия в отложениях сантон-кампанского возраста, значительно удаленная от границ выклинивания в них зон окисления (фиг. 17).

Радиоактивные аномалии интенсивностью от 15 до 300 мкр/час в отложениях верхнего сантона–кампана, расположенные на удалении более 1.0–1.5 км от границы выклинивания зоны пластового окисления, образуют полосу 5 × 1.5 км вдоль зоны Кенимехского разлома, которая приурочена к узлам пересечения ее северо-восточными нарушениями и к внешней зоне кислотного выщелачивания (фиг. 17). Для них характерно радиоактивное равновесие (Kpp = 90–105%) при содержании урана до 250 г/т, отсутствие собственных урановых минеральных включений и приуроченность к различным минералам, главным образом, к фосфатам: сванбергит, варисцит, гояцит и кальциево-железистый фосфат, с которыми связано более 90% валового его содержания. Элементами-спутниками урана являются Se, Re, Mo и Ag, а также Pb, V, As, Sb и др., которые также в большинстве случаев не образуют собственных минералов, исключая микровыделения самородного серебра, α-селена и клаустолита (Винокуров и др., 1990, 1995).

Широкое развитие на Кенимехском и других месторождениях Букинайского рудного поля значительных участков эксфильтрационной концентрации урана и сопутствующих элементов (Тохумбет, Палваната, Четтык, Кенимех) представ-



Фиг. 17. Схема развития радиоактивных аномалий в кампанских отложениях юго-западного фланга месторождения Кенимех (Винокуров и др., 1995). 1 – контур радиоактивных аномалий; 2 – ареалы развития каолинизации – обеления (а) и осветления (б) в кварц-глауконитовых песках и песчаниках кампана; 3 – разрывные нарушения; 4 – границы выклинивания рудной зоны пластового окисления в отложениях кампана; 5 – контур участка детализации ПВ-86; 6 – тектонические нарушения с гидродинамическим перетоком.

ляется важным рудоподготовительным фактором для образования промышленных инфильтрационных руд. Эти участки являются местными источниками урана и сопутствующих элементов.

Выявлены сложные взаимоотношения между изменениями пород окислительного и восстановительного ряда, которые указывают на перемежаемость их во времени. Обычно зона пластовой лимонитизации накладывается на гидротермальные новообразования и красноцветное окисление. Это также подтверждается данными исследований флюидных включений в метасоматическом доломите, которые гомогенизуются при температуре 133–142°С (Винокуров и др., 1995). Однако имеются случаи наложения процессов восстановления на зону пластовой лимонитизации с формированием ореолов вторичного осветления и красноцветного ожелезнения пород.

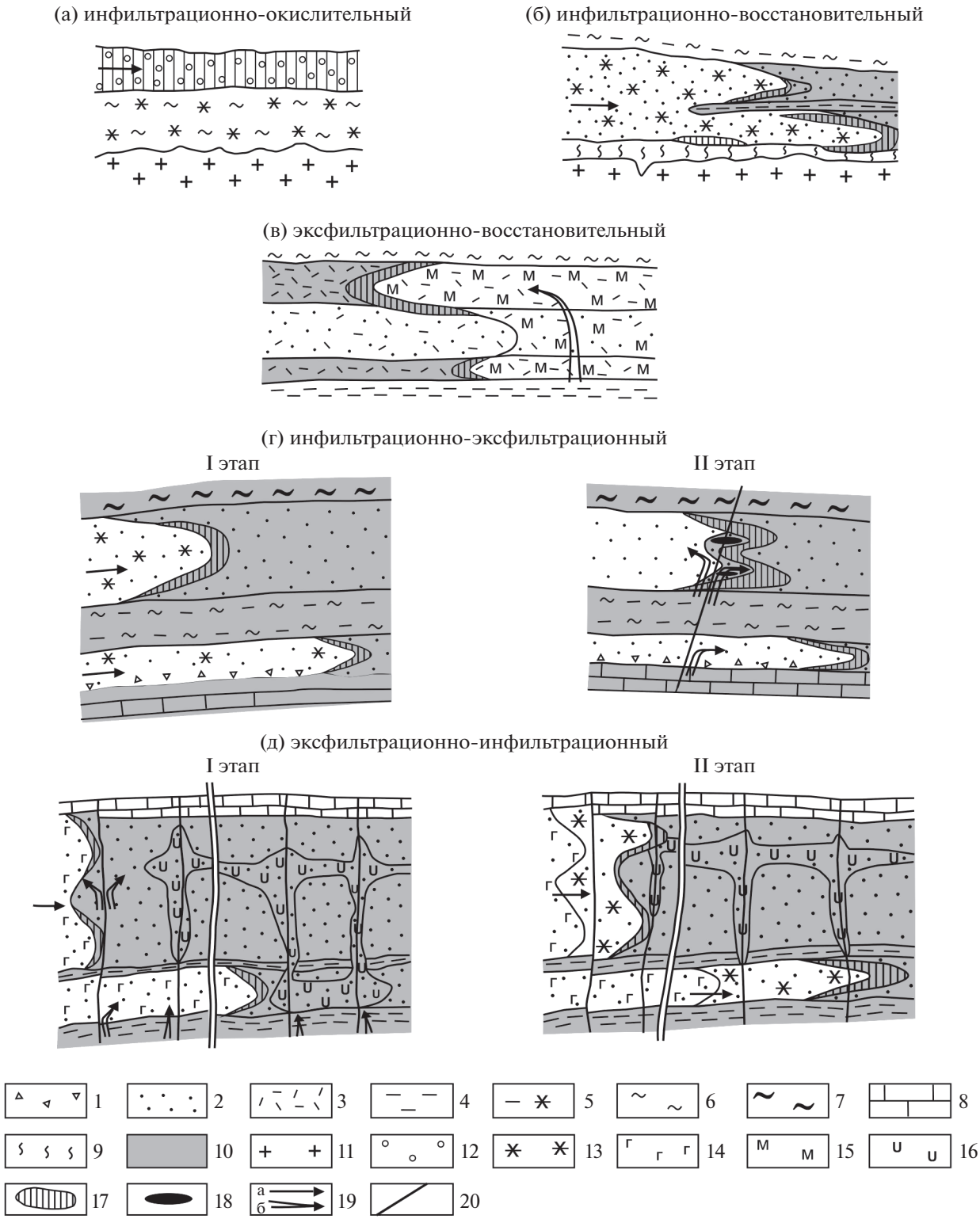
Рудные залежи месторождения Кенимех приурочены к выклиниванию зоны пластового окисления. Их протяженность более 15 км в различных горизонтах верхнего мела, преимущественно на глубинах от 300 до 700 м. В плане они представлены узкими (до 150 м) извилистыми лентами, а в разрезе преобладают линзовидные тела, переходящие в роллы мощностью от 0.5 до 10.0 м при широком диапазоне содержаний урана – 0.01–0.5% (фиг. 16). Урановые руды содержат до 5.5 г/т селена и рения, а также спорадические повышенные содержания Mo от 0.005 до 0.05% (Винокуров и др., 1995).

Таким образом, тип эксфильтрационных-инфильтрационных гидрогенных месторождений отличается от всех остальных локализацией на выклинивании желто- и красноцветных зон пластового окисления, в области развития изменений пород восстановительного ряда, с которыми первые имеют сложные взаимоотношения. С одной стороны, к внешней зоне кислотного выщелачивания приурочены обширные радиоактивные аномалии, являющиеся местными источниками урана и сопутствующих элементов. С другой стороны, более поздние проявления углеводородов увеличивают восстановительную емкость пород. К этому типу относятся месторождения урана Учкудукского, Сугралинского и Сабырсайского рудных полей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании характеристики ряда гидрогенных месторождений урана и их генезиса, по направленности потока отлагавших руды вод и его изменению и, соответственно, по изменению рудоконтролирующей эпигенетической зональности, выделено пять основных промышленно-генетических типов месторождений.

1. Первый, инфильтрационно-окислительный, контролируется вертикальной геохимической зональностью зоны окисления с отложениями слюдковых руд вблизи уровня подземных вод, обогащенных ураном и сопутствующими элементами (фиг. 18а). Концентрация их в подземных водах



Фиг. 18. Схема формирования гидрогенных месторождений урана разного типа. 1 – гравийники; 2 – пески, песчаники; 3 – туффиты; 4 – алевролиты; 5 – глины коричневые; 6 – глины алевритистые; 7 – глины углистые; 8 – известняки; 9 – кора выветривания; 10 – обогащенные органикой породы; 11 – граниты; 12 – калькреты; 13 – лимонитизация; 14 – гематитизация; 15 – монтмориллонитизация; 16 – аномальные концентрации урана;17 – урановое оруденение; 18 – богатые урановые руды; 19 – направление движения вод: а – инфильтрационных, б – эксфильтрационных; 20 – разломы.

происходила либо за счет уникального испарения (в случае с Йилирри), либо в связи с растворением первичного оруденения в породах различного возраста.

2. Второй тип, инфильтрационно-восстановительный, подчиняется горизонтальной геохимической зональности пластового окисления с образованием преимущественно урановых окислов на границе желтоцветных окисленных пород и кайнозойских сероцветных отложений, обогащенных органическим веществом (фиг. 18б). Аномальные содержания урана в водах появляются за счет выщелачивания из рудопроявлений в фундаменте, расположенных преимущественно за пределами месторождений.

3. Третий тип, эксфильтрационно-восстановительный, согласуется с горизонтальной геохимической зональностью, но с образованием в основном бедного уран-фосфорного (нингиоитового) оруденения в кайнозойских осадках на границе серых и зеленых пирокластов, которая обусловлена появлением монтмориллонита в связи с воздействием восходящих нагретых сульфатных вод (фиг. 18в). Пирокласты являются местным источником урана, т.к. кислое вулканическое стекло содержит около 30 ppm урана.

4. Четвертый тип, инфильтрационно-эксфильтрационный, является полигенным с настурановым, коффинитовым или нингиоитовым оруденением в пределах контакта белесых песков с вынесенным железом и органикой и кайно-мезозойскими породами, обогащенными углеродистым веществом. Им присуще наличие богатых руд, отличающихся повышенными содержаниями циркония и средних–тяжелых лантаноидов с V-образным характером их распределения. Для них типично присутствие гранитов и рудопроявления урана в области питания, которые являются местными источниками необходимых компонентов. Предполагается, что образование месторождений происходило в два основных этапа: на первом проявилось грунтово-пластовое оруденение, контролируемое зоной окисления, а на втором произошла переработка экзогенных руд восходящими углекислыми растворами различного генезиса с образованием современного облика (фиг. 18г).

5. Пятый тип, эксфильтрационно-инфильтрационный, также полигенный, преимущественно с настурановыми рудами на границе с окисленными красноцветными и желтоцветными песками в мезозойских породах, содержащих углеродистое вещество. Образование их также является двухэтапным: на первом, прежде всего, возникают участки с обширными ореолами аномальных концентраций урана и сопутствующих элементов в рудовмещающих отложениях (Кенимех, Павланата и др.), которые служат местными источниками. На этом же этапе происходит доломитизация и обогащение рудовмещающих пород углеродистым веществом за счет восходящих нагретых углекислых растворов, а также красноцветное окисление проницаемых горизонтов при смешении их с метеорными водами. На втором этапе продолжается развитие зоны окисления, но уже желтоцветной, метеорными пластовыми водами с отложением современных урановых руд (фиг. 18д).

Предложенная типизация гидрогенных месторождений урана не является окончательной, т.к. не включает крупномасштабные объекты Чу-Сарысуйской урановой провинции и других зарубежных районов, с которыми автор знаком по опубликованным работам. С этих позиций Чу-Сарысуйские крупномасштабные местророждения можно рассматривать в виде самостоятельного типа с двумя инфильтрационными длительными этапами (палеоценовым и неоген-четвертичным) и вероятным промежуточным эксфильтрационным для Инкай-Мынкудукского рудного пояса, локализованного в отложениях верхнего мела. По нашему мнению, наиболее перспективными для РФ представляются второй и четвертый типы гидрогенных месторождений урана.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит чл.-корр. РАН В.А. Петрова и проф. А.А. Пэка за детальное ознакомление и замечания к статье, двух анонимных рецензентов за конструктивные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН “Тектонодинамические обстановки и физико-химические условия формирования минеральных систем основных промышленно-генетических типов урановых месторождений”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арапов Ю.А., Бойцов В.Е., Кремчуков Г.А. и др. Урановые месторождения Чехословакии. М.: Недра, 1984. 445 с.

Белова Л.Н., Горшков А.И., Иванова О.А. Новые данные о нингиоите: железосодержащий нингиоит // Докл. АН СССР. 1978. Т. 234. № 4. С. 1022–1023.

Бойл Д.Р. Геология и фациальные условия образования урановых месторождений базального типа в осадочных породах // Матер. по геологии урановых месторождений зарубежных стран. 1985. Вып. 34. С. 48–56.

Винокуров С.Ф. Геохимические особенности и условия образования уранового оруденения в угленосных отложениях среднего палеогена Украинского щита: дисс. ... канд. геол.-минералог. наук. 1970. 205 с.

Винокуров С.Ф. Естественно-научные основы устойчивого развития. Радиогеология. Учебное пособие. М.: РХТУ им. Д.И.Менделеева. 2009. 176 с.

Винокуров С.Ф., Васильева Э.Г. Об условиях эпигенетической концентрации рудных элементов в буроугольных отложениях // Литология и полезные ископаемые. 1973. № 3. С. 130–134.

Винокуров С.Ф., Воскресенская Н.Т. О природе аномальных концентраций таллия в буроугольных отложениях // Геохимия. 1971. № 12. С. 1468–1476.

Винокуров С.Ф., Меньшиков В.В. Роль гидротермальных образований в формировании комплексного инфильтрационного месторождения Кенимех // Редкометально-урановое рудообразование в осадочных породах. М.: Наука, 1995. С. 144–160.

Винокуров С.Ф., Нестерова М.В. Новый механизм формирования уран-титановой ассоциации в рудах палеодолинных месторождений // ДАН. 2010. Т. 431. № 3. С. 371–376.

Винокуров С.Ф., Стрелкова Е.А. Условия образования палеодолинных месторождений в осадочно-вулканогенных отложениях верхнего эоцена – нижнего олигоцена Болгарии // Геология руд. месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 171–188.

Винокуров С.Ф., Шумлянский В.А. Рудно-битумная минерализация Днепровско-Донецкого и Волгоградско-Жирновского авлакогенов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1984. № 1. С. 85–95.

Винокуров С.Ф., Меньшиков В.В., Синенький Л.А. Шаровидный самородный селен как индикатор проявления гидротермальных процессов на гидрогенных комплексных месторождениях // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. № 2. С. 430–433.

Винокуров С.Ф., Дойникова О.А., Крылова Т.Л., Меньшиков В.В., Нестерова М.В., Рыжов Б.И., Сысоев А.Н. Литолого-геохимические и минералогические особенности Малиновского месторождения урана // Геология руд. месторождений. 2001. Т. 43. № 5. С. 414–429.

Винокуров С.Ф., Прокофьев В.Ю., Дымков Ю.М., Нестерова М.В. Флюидные включения в поздних минеральных образованиях на палеодолинных месторождениях урана Западно-Сибирского рудного района: Термохимические особенности и генетические следствия // Геохимия. 2013. № 10. С. 924–946.

Винокуров С.Ф., Прокофьев В.Ю., Мальковский В.И., Дымков Ю.М., Чугаев А.В., Нестерова М.В. Неотектонический этап формирования Хохловского месторождения урана (Восточное Приуралье): структурные, гидрогеохимические и минералого-геохимические условия рудообразования // Геология руд. месторождений. 2013. Т. 55. № 6. С. 481–512.

Винокуров С.Ф., Магазина Л.С., Стрелкова Е.А. Редкоземельные и редкие элементы в урановых рудах палеодолинных месторождений Витимского района: характер распределения, генетическое и практическое значение // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 2. С. 141–162.

Дойникова О.А. Минералогия урана восстановительной зоны гипергенеза (по данным электронной микроскопии). М.: Физматлит, 2012. 216 с.

Зеленова О.И., Крылов О.Н., Лисицин А.К., Маринов Б.Н. Урановое оруденение в туфогенно-осадочных отложениях палеогена юго-восточной Болгарии // Матер. по геологии урановых месторождений. 1985. Вып. 96. С. 31–41.

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

Коченов А.В., Халезов А.Б., Шмариович Е.М., Дубинчук В.П. О минералого-геохимических особенностях инфильтрационных урановых месторождений “базального” типа // Литология и полезн. ископ. 1990. № 1. С. 123–132.

Коченов А.В., Халдей А.Е. К вопросу об источниках урана в экзогенных эпигенетических месторождениях // Литология и полезн. ископ. 1997. № 4. С. 371–378.

Лаверов Н.П., Смилкстын А.О., Шумилин М.В. Зарубежные месторождения урана. М.: Недра, 1983. 320 с.

Лаверов Н.П., Рыбалов Б.Л., Величкин В.И. и др. Основы прогноза урановорудных провинций и районов. М.: Недра, 1986. 206 с.

Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К. и др. Уран Российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.

Михайлов Я., Крылов О.Н., Стрелянов Н.П. и др. Особенности формирования экзогенного уранового оруденения в туфогенно-осадочных породах палеогена // Геология руд. месторождений. 1987. № 1. С. 87–93.

Тарханова Г.А., Дубинчук В.Т., Чистякова Н.И. и др. Особенности минерального состава и условия формирования руд Вершинного месторождения // Разведка и охрана недр. 2014. № 6. С. 7–13.

Тедеско К. Урановое оруденение в четвертичных вулканических породах в северной части провинции Лацио // Геология, геохимия, минералогия и методы оценки месторождений урана. М.: Мир, 1988. С. 116–118.

Халезов А.Б., Долбилин С.И., Марков С.Н. и др. Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона. М.: РИС ВИМС. “Минеральное сырье”. 2009. 145 с.

Шмариович Е.М. Типизация пластово-инфильтрационных месторождений урана по характеру артезианских бассейнов // Советская геология. 1986. № 8. С. 31–38.

Kajitani K.A. Geochemical study on the genesis of ningyoite the special calcium uranous phosphate mineral // Econ. Geol. 1970. V. 65. P. 470–480.

Muto T. The precipitation environment of ningyoite // Mineral. Japan. 1962. № 3. P. 306–337.

Reynolds R.L., Goldhaber M.B. Origin of a South Texas roll-type uranium deposit: I. Alteration of iron-titanium oxide minerals // Econ. Geol. 1978. V. 73. № 8. P. 1677–1689.

Fischer R.P. Similarities, differenses and some genetic problems of the Wydning and Colorado Platean types of uranium deposits in sandstone // Econ. Geol. 1970. V. 65. P. 778–784.

World distribution of uranium deposits with deposits classification. IAEA-TECHDOC-1629. Vienna: IAEA, 2009. 117 p.