

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им Н.М. Федоровского»
(ФГУП «ВИМС»)

На правах рукописи

Сащенко Анна Владимировна

**ЭВОЛЮЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ УРАНА НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ
БАЗАЛЬНЫХ ПАЛЕОДОЛИН И ОСОБЕННОСТИ ИХ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
СПОСОБОМ СПВ**

Специальность 1.6.10 – Геология, поиски и разведка
твердых полезных ископаемых, минерагения

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель
доктор геол.-минер. наук,
И.Г. Печенкин

Москва, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Становление теории формирования песчаниковых месторождений урана	6
2. Геологическое строение урановых объектов Витимо-каренгского, Витимского и Зауральского районов и литогеохимические условия локализации оруденения	11
2.1. Геологическое строение урановых рудопроявлений Витимо-Каренгского района	13
2.2. Геологическое строение месторождений Витимского района	19
2.3. Геологическое строение Зауральского региона	25
3. Последовательное формирование урановорудных концентраций на стадиях литогенеза и роль растительного органического вещества	34
3.1. Накопление урана на стадии седиментогенеза (Витимо-Каренгский район)	36
3.2. Последовательность накоплений урана на ранних стадиях диагенеза (Витимский район)	39
3.3. Накопление урана на поздней стадии диагенеза и эпигенеза (Зауральский район)	47
3.4. Роль гуминовых кислот в рудогенезе	52
4. Изменение вещественного состава руд при проведении СПВ	61
4.1. Выщелачивание урана на месторождениях Витимского района	62
4.2. Выщелачивание урана на месторождениях Зауральского района	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	87
Список принятых в работе сокращений	89
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	90

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

В настоящее время отечественная атомная энергетика обеспечивает около 20 % производимой электроэнергии в России (Бойцов, 2022). В связи с запланированным увеличением установленных мощностей АЭС страны и обеспечением действующих контрактов за рубежом, пропорционально возрастут и потребности отрасли в природном уране. Уже сейчас имеющийся дефицит в урановом сырье покрываются складскими запасами, импортным сырьем и вторичными источниками. Сложившаяся негативная ситуация определяет необходимость интенсификации поисковых и добычных работ на уран. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области являются поиски и разведка месторождений песчаникового типа, пригодных для отработки наиболее экономичным способом скважинного подземного выщелачивания (СПВ). Доля объектов песчаникового типа в производстве урана в течение последних лет в стране и в мире составляет более 55 %. Наиболее целесообразным представляется сосредоточение геологоразведочных работ (ГРР) на территории РФ в известных урановорудных районах (УРР), таких как Витимский и Зауральский (Основные ..., 2022), где в настоящее время осуществляется добыча способом СПВ предприятиями АО «Хиагда» и АО «Далур». Поиски таких объектов является весьма трудоемкой задачей в связи со скрытым характером рудных залежей. Имеются также и проблемы на стадии добычи, обусловленные наличием остаточных и переотложенных форм рудного вещества после воздействия сернокислотных растворов. Таким образом, понимание природных условий формирования и эволюции уранового оруденения песчаникового типа и его преобразования на стадии отработки способом СПВ является весьма актуальным.

Целью диссертационной работы является установление последовательности формирования рудовмещающих пород и урановой минерализации в базальных палеодолинах, а также причин наличия переотложенного и остаточного рудного вещества в процессе добычи способом СПВ.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие основные **задачи**:

- •Уточнить особенности формирования уранового оруденения месторождений песчаникового типа в базальных палеодолинах Витимского и Зауральского УРР.
- •Провести сравнительный анализ условий локализации уранового оруденения изученных объектов и выявить ведущие факторы рудогенеза.
- •Установить последовательность преобразования рудовмещающих пород и накопления концентраций урана (от сорбции через гели к минеральным формам) на различных стадиях литогенеза.
- •Определить влияние вещественного состава пород и урановых руд на эффективность

проведения СПВ.

о •Определить природу повышенных концентраций урана (остаточная или переотложенная) в рудовмещающих толщах после воздействия серноокислотных растворов.

В диссертации рассматривается образование рудных скоплений на рудопроявлениях Витимо-Каренгского района, имеющих сингенетическое происхождение, на месторождениях Витимского района, сформированных в условиях последовательного проявления продуктивных процессов сингенеза, диагенеза и эпигенеза, а также на месторождениях Зауральского района, образованных, главным образом, эпигенетическими процессами воздействия кислородсодержащих ураноносных грунтово-пластовых вод на первично сероцветные песчано-глинистые отложения протяженных палеодолин.

Научная новизна:

1) Установлена закономерность и последовательность образования определенных форм урана (ионно-сорбционная, минеральная и др.) на различных стадиях литогенеза.

2) Определено значение углефикации растительного органического вещества (РОВ) в накоплении урановых концентраций.

3) Показано влияние некоторых компонентов (РОВ, сульфиды, бактериальные сообщества) рудовмещающих пород на процесс добычи урана методом СПВ.

4) Установлен генезис (остаточный или переотложенный) минеральных форм урана в рудовмещающих горизонтах после добычи способом СПВ.

Практическая значимость:

Полученные в ходе исследования данные, в части уточнения генезиса месторождений урана в базальных палеодолинах, используются в рамках прогнозных и поисковых работ, проводимых в пределах Витимского УРР ФГБУ «ВИМС» и АО «Урангео».

Результаты минералого-геохимического изучения рудовмещающих отложений, претерпевших воздействие серноокислотных растворов в процессе СПВ, позволяют повысить степень извлечения урана. Полученные данные планируется использовать при отработке месторождения Добровольное (Зауральского УРР), подготавливаемого к освоению предприятием АО «Далур».

Методы исследований. Настоящая работа включала анализ и обобщение фондовых и опубликованных материалов, а также полевую документацию с отбором проб и камеральную обработку. По результатам геологической документации керна скважин проведено литолого-фациальное картирование, установлена проявленность эпигенетических процессов, а также уточнено геолого-структурное положение уранового оруденения. В процессе камеральной обработки изучены минералого-петрографические и геохимические особенности урановой минерализации и рудовмещающих пород. Помимо традиционных оптических методов изучения,

в связи с тонкодисперсной размерностью урановых накоплений использовались прецизионные методы исследования, выполненные в лабораториях ФГБУ «ВИМС»: растровая и просвечивающая электронная микроскопия (РЭМ, ПЭМ); рентгеновский микроанализатор (РСМА) JEOL JXA 8100, укомплектованный энергодисперсионной приставкой INCA, метод автордиографии, рентгенографический анализ. Радиоизотопные исследования осуществлены гамма-спектрометрическим методом с использованием «ORTEC-65195-P/DSpecPlus». Микробиологические исследования проведены в Институте микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН. Геотехнологические испытания проведены по стандартной методике, разработанной в ФГБУ «ВИМС» и АО «ВНИИХТ».

Апробация полученных данных. Основные результаты и отдельные защищаемые тезисы докладывались на Ученом совете ФГБУ «ВИМС», на VII Российской молодежной научно-практической школе (Москва, 2018), на Восьмой научно-практической школе-конференции молодых ученых и специалистов (Москва, 2019), на V международном симпозиуме «Уран: Геология, Ресурсы, Производство» (Москва, 2021 г.), на VI Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» (Томск, 2021), X межвузовской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о Земле» (Москва, 2022 г., 2023). Основные идеи и результаты работы отражены в 10 публикациях, в том числе 3 – в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ. Основные идеи и результаты работы отражены в 10 публикациях, в том числе 2 в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 143 наименований. Объем работы составляет 100 страниц, 52 иллюстраций и 25 таблиц.

Благодарности.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю И.Г. Печенкину за руководство, поддержку и обсуждение полученных результатов. Диссертант сердечно благодарит своего учителя, к. г.-м. н. Г.А. Тарханову за ценные замечания, редакцию и проведение совместных исследований. Автор глубоко признателен за неоценимую помощь, поддержку и критические замечания д. г.-мин. н. И.Г. Луговской, к. г.-м. н. С.Д. Расуловой, к. г.-м. н. Тюленевой В.М., д. г.-мин. н. Щеточкину В.Н., к. г.-м. н. Н.В. Леденовой, Г.И. Авдониной, М.А. Рогожиной, а также руководителю отдела урана и редких металлов Н.А. Гребенкину. За практическую помощь и содержательные консультации диссертант искренне благодарен сотрудникам отдела уранового сырья и отделения аналитических, минералогических и геотехнологических исследований ФГБУ «ВИМС». Особую благодарность автор выражает научному руководителю ФГБУ «ВИМС» профессору Г.А. Машковцеву.

1. СТАНОВЛЕНИЕ ТЕОРИИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕСЧАНИКОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

Создание минерально-сырьевой базы (МСБ) урана в России имеет длительную историю. Наиболее остро вопрос поисков месторождений урана в стране был обозначен в конце Второй мировой войны, когда необходимость создания атомного оружия потребовала скорейшего открытия отечественных месторождений урана (Бастриков, Печенкин, 2016). В 1943 г. перед Всесоюзным институтом минерального сырья (ВИМС) Государственным комитетом обороны была поставлена комплексная задача разработки методов прогноза, происков и добычи урановых руд (Становление ..., 2023; Урановой ..., 2013). С тех пор институт занимается комплексным изучением месторождений, в том числе проводит минералогические, радиологические, структурные, литолого-фациальные и другие необходимые исследования на всех стадиях геологоразведочных работ.

Особое место в формировании МСБ урана занимают месторождения песчаникового типа, согласно типизации МАГАТЭ (Geological ..., 2018), обрабатываемые наиболее экономичным и экологичным методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ).

За годы поисковых и разведочных работ сменилось несколько концепций и теорий формирования уранового оруденения, что оказало существенное влияние на процесс открытия урановорудных районов.

Одним из первых результатов поисковых работ в Советском Союзе стало открытие уран-редкометалльных месторождений в морских диктионемовых сланцах Прибалтики. На основе детального изучения условий формирования руд М.Н. Альтгаузен (1956) была разработана теория сингенетического накопления урана, молибдена, редкоземельных металлов (РЗМ) в морских углеродистых сланцах, черных глинах и фосфоритах. Эта теория впоследствии активно использовалась при геологоразведочных работах (Альтгаузен, 1956).

Дальнейшие открытия месторождений урана были связаны с внедрением в практику геологоразведочных работ аэрогамма-поисков, в результате чего было выявлено месторождение Меловое (Мангышлакский район, Казахстан), приуроченное к масштабному скоплению костного детрита рыб с сорбционными накоплениями урана и сопутствующих элементов при нормально осадочном (сингенетическом) формировании руд (Столяров, Ивлева, 2008; Шарков, 2011).

Применение сингенетической теории накопления урана привело к открытию однотипных месторождений в карбонатных палеогеновых породах Северной Ферганы, в результате чего эта теория стала общепризнанной, развивалась и модифицировалась (Данчев и др., 1966; Печенкин, 2012).

Применение аэрогамма-поисков на территории Центральных Кызылкумов привело к выявлению множества приповерхностных аномалий и рудопроявлений, а затем и уникального

месторождения Учкудук (Республика Узбекистан). Большинство ученых, учитывая приуроченность руды к подводной дельте туронского моря, считали, что это месторождение типично осадочного (сингенетического) происхождения. При этом в ходе детальной разведки ведущие геологи ГРП-25 В.М. Мазин и Г.А. Печенкин (Становление ..., 2023) обратили внимание на приуроченность уранового оруденения к границе желтых (окисленных) и серых (первичных, неизмененных) пород, что стало эмпирическим критерием дальнейших поисковых работ. Наличие многочисленных факторов, не соответствующих сингенетической теории, в основном афациальное распространение оруденения, приуроченного к границе желтоцветных и сероцветных пород, привели к дискуссии о генезисе руд. На примере данного месторождения стали формироваться основы теории экзогенного пластово-инфильтрационного рудообразования эпигенетических месторождений урана, основными авторами которой являлись сотрудники ВИМСа Е.М. Шмариович, Е.А. Головин и М.Ф. Каширцева (Экзогенные ..., 1965; Шмариович, 2007; Становление ..., 2023). Очень быстро данная теория была внедрена в практику геологоразведочных работ, что привело к открытию крупнейшей урановорудной провинции в мире – Притяньшанской, в результате последующего изучения которой было установлено, что урановые месторождения образованы в результате осаждения урана из нисходящих кислородсодержащих пластовых вод на геохимических барьерах различных типов (Экзогенные ..., 1965; Перельман, 1972; Учкудукский ..., 1996; Кисляков, Щеточкин, 2000 и другие).

Значительный вклад в разработку теоретических основ экзогенно-эпигенетического рудообразования внесли сотрудники Экспедиции № 1 ИГЕМ АН СССР, в особенности А.И. Перельман, А.К. Лисицин, И.А. Кондратьева и другие (Экзогенные ..., 1965; Перельман, 1972; Лисицин, 1975). А.И. Перельманом (Перельман, 1968) разработано учение о геохимической среде рудообразования, геохимических барьерах, вопросах миграции и концентрации урана и других элементов в гипергенных условиях различных климатических зон. Для зоны гипергенеза А.И. Перельман выделил три обстановки водной миграции: окислительная (есть свободный кислород), восстановительная без сероводорода (глеевая) и восстановительная сероводородная (Перельман, 1972). В основу качественного разделения сред положены три характерных компонента-антагониста: O_2 , H_2S , Fe^{+2} . Особое значение в миграции урана играют воднорастворимые уран-органические соединения (Перельман ..., 1977).

Группа А.К. Лисицина разрабатывала аспекты гидрогеохимии урановорудных процессов и особенности переноса урана в водных средах. Изучалась роль микроорганизмов при формировании геохимического барьера, и было установлено, что при их участии руды становятся более контрастными (Лисицин, 1975). Кроме того, было доказано, что поступление урана происходит в шестивалентной форме с кислородными инфильтрационными водами в виде

уранил-карбонатных комплексов ($\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ и $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$). Промышленные месторождения урана в этом случае связаны с деятельностью пластовых вод. Для формирования зон пластового окисления требуется градиент напора и наличие богатых окислителями (кислородом) вод, что способствует переводу элементов с переменной валентностью в более высокое валентное состояние (Лисицин, 1975; Лаверов и др., 2000).

По мере накопления данных об экзогенно-эпигенетических месторождениях изучалась и роль органического вещества в формировании инфильтрационных урановых месторождений. Было установлено, что на пластово-инфильтрационных месторождениях Кызылкумского района выделяются две группы органического вещества: сингенетического происхождения, прежде всего углефицированный материал, накопление которого происходило одновременно с терригенными осадками, а также эпигенетического генезиса, представленного битумами, принесенными в породу различными восстановительными процессами (Оношко, 1972; Экзогенные ..., 1965). Распространение углефицированного растительного вещества в сероцветных породах подчиняется литолого-фациальному и стратиграфическому контролю (Кисляков, Щеточкин, 2000). Сингенетическое растительное органическое вещество широко распространено в терригенных континентальных отложениях, особенно в палеодолиньных структурах. Восстановление урана растительным детритом было рассмотрено и доказано многочисленными работами С.Д. Расуловой (Расулова, 1971; Коченов, Расулова, 1978), А. Салаи (1964), С.М. Манской (Манская, Дроздова, 1964).

Таким образом, классическая теория формирования урановых экзогенно-эпигенетических руд была разработана для крупных месторождений Кызылкумской, Сырдарьинской и Чу-Сарысуйской провинций, для которых характерен длительный инфильтрационный режим, развитие региональных зон пластового окисления на значительной удаленности от областей питания (гидрогеологических массивов) (Максимова, Шмариович, 1993). В результате многолетних научно-исследовательских работ было установлено и доказано, что наиболее благоприятными для образования уранового оруденения из пластовых кислородсодержащих ураноносных вод являются песчано-глинистые отложения сероцветного и черноцветного геохимического типа с высокими содержаниями $C_{\text{орг}}$ – от 2–3 до 10 %. Как отмечали многочисленные исследователи, формирование рудовмещающих отложений сероцветного и черноцветного геохимических типов обусловлено накоплением углистого детрита различной морфологии и сохранности. Большое значение углистого детрита в концентрировании урановой минерализации связано с его высокой восстановительной и сорбционной способностью (Некрасова, 1957; Экзогенные ..., 1965; Максимова, Шмариович, 1993).

Различные аспекты металлогенического анализа, включая распределение сингенетических и эпигенетических восстановителей, рассмотрены в работах ВСЕГЕИ (Критерии ..., 1999; Литогеодинамика ..., 1998).

При этом палеодолинные структуры, формирование которых происходило преимущественно в гумидных обстановках, не сразу стали рассматриваться как перспективные структуры для локализации уранового оруденения. При обнаружении ореолов радиоактивности в подобных структурах применялись критерии и признаки урановых месторождений, разработанные для экзогенно-эпигенетических месторождений зон пластового окисления. При этом не учитывалось, что рудовмещающие отложения характеризуются более глинистым составом, меньшей проницаемостью, достаточно коротким временным интервалом формирования руд и рядом других особенностей. Только на древних месторождениях, где рудовмещающими породами являются типично аллювиальные отложения в Зауральском регионе (Халезов, 2009, 2017), возможно развитие классической зоны пластового окисления, на более молодых же месторождениях в Витимском регионе (Витимский ..., 2015; Уран ..., 2010) она не формируется.

Параллельно с разработкой теории рудообразования урановых экзогенных руд решался вопрос о добыче урана. Учитывая то, что руды такого типа часто бедные, и содержание урана не превышает 0,0n %, разработка месторождений горным способом экономически невыгодна. В связи с этим потребовалось разработка новых, более экономичных методов добычи. Первоначально, в связи близповерхностным залеганием урановых руд, месторождение песчаникового типа (Учкудук) разрабатывалось карьером, а затем шахтой (Авдонин и др., 1986; Салтыков, Авдонин, 2017; Салтыков и др., 2018). Позднее на месторождении Девладова (Украина) и Учкудук (Узбекистан) были проведены первые опытные работы по применению СПВ (Салтыков и др., 2018). В дальнейшем метод СПВ стал применяться повсеместно на месторождениях урана песчаникового типа (Подземное ..., 1998). На ранних стадиях ГРП применялись натурные опытно-промышленные работы, по длительности и трудоемкости сравнимые с добычными, что привело к необходимости разработки более простого метода оценки геотехнологических свойств руд на стадии разведки. Такой метод был разработан и апробирован в ВИМСе В.А. Грабовниковым (Грабовников, 1995). Это был недорогой и относительно быстрый двухскважинный метод, основанный на дебалансе дебитов откачной и закачной скважин, что позволяло стабилизировать контур выщелачивания и получать достаточно точные оценки геотехнологических параметров уже на стадии детальной разведки. Вклад в становление и внедрение метода СПВ на отечественных месторождениях песчаникового типа внесли сотрудники ВНИИХТА (Фазлуллин, 2005; Подземное ..., 1998).

Несмотря на многолетние исследования и широкий диапазон решаемых вопросов, ряд проблем, таких как влияние восстановителей различного типа, в том числе сингенетических (торф, лигниты, угли, углефицированные растительные остатки, дисульфиды железа) на формирование промышленных руд, перераспределение урана при эпигенетических процессах, а также роль растительного органического вещества в процессах извлечения урана при проведении СПВ – не были достаточно изучены.

В настоящее время одним из ведущих типов отечественных урановых месторождений, составляющих основу МСБ, является палеодолинный, преимущественно локализующийся в русловых, овражно-балочных, пойменных и других структурах. Для эффективной отработки руд указанных месторождений необходим комплексный анализ ряда вопросов: о первичном накоплении и последующим перераспределении урана, его взаимодействии с восстановителями и бактериальным сообществом на различных стадиях литогенеза. Следовательно, необходимо рассмотреть ряд качественных исследований последних лет специалистов в области урановой геологии и наших наблюдений, которые требуют обобщения для решения поставленных в работе задач.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ УРАНОВЫХ ОБЪЕКТОВ ВИТИМО-КАРЕНГСКОГО, ВИТИМСКОГО И ЗАУРАЛЬСКОГО РАЙОНОВ И ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОРУДЕНЕНИЯ

На территории России песчаниковые урановые месторождения представлены палеодолиным типом, согласно классификации МАГАТЭ (Geological ..., 2018), или «витимским», по классификации, принятой в России (Уран ..., 2010; Прогноз ..., 1997). Разрабатываемые промышленностью объекты этого типа расположены в Витимском и Зауральском УРР. Также на территории России распространены месторождения урана в приповерхностных торфяно-почвенных отложениях пойм рек, к которым относятся объекты Витимо-Каренгского района. Помимо России, палеодолинные месторождения базального подтипа также известны в Японии (Нингио-Тогэ), Канаде, Аргентине, Австралии, Нигере и в других странах (Dahlkamp, 1993; Surficial ..., 1984; Уран ..., 2010; Тарханов, Бугриева, 2012; Тарханов, Бугриева, 2015).

На палеодолиных месторождениях урана рудовмещающие породы представлены, как правило, терригенными континентальными отложениями, обогащенными углефицированным растительным детритом, что позволяет относить их к сероцветному и черноцветному геохимическим типам с содержаниями $C_{орг}$ более 1 процента. Формирование урановых месторождений в палеодолиных структурах обусловлено движением кислородсодержащих ураноносных вод от бортов и верховьев к осевой части, а затем к низовью. В отличие от урановых месторождений зон регионального пластового окисления, для палеодолиных месторождений характерна относительная кратковременность формирования, что определяет необходимость наличия контрастного восстановительного геохимического барьера, образование которого связано в основном с обогащением пород углистым органическим веществом. На подобных месторождениях начало формирования уранового оруденения связано с условиями седиментогенеза и диагенеза, а завершение обусловлено проявлением эпигенетических процессов (Особенности ..., 2014; Расулова и др., 2007; Викентьев, Кайлачаков, 2020; Уникальное ..., 2020).

Урановые объекты в базальных палеодолиных структурах обладают определенными рудогенетическими особенностями, что выражается в различиях по условиям локализации, масштабу оруденения, возрасту вмещающих пород и типу урановой минерализации. Рудопроявления Витимо-Каренгского района формируются в современную эпоху, локализуются в четвертичных торфяно-почвенных отложениях, и урановые накопления являются сингенетическими (Пешков и др., 2015; Миронов и др., 2015). Месторождения Витимского района образованы в локальных неоген-четвертичных врезках, накопление урановых концентраций происходило здесь в результате последовательного проявления сингенетических,

диагенетических и инфильтрационных процессов (Витимский ..., 2015; Тарханова, Прохоров, 2017). Месторождения Зауральского района сформированы в ходе длительных неоднократных окислительно-восстановительных эпигенетических процессов в протяженных юрско-меловых руслах (Халдей и др., 1998; Халезов, 2009). На аналогичных объектах, ведущая роль в концентрации урана принадлежит растительному органическому веществу, что не только определяет минералого-геохимические особенности оруденения, но и оказывает существенное влияние на процессы добычи урана методом СПВ. Растительное органическое вещество на рассматриваемых объектах представлено как тонкодисперсной разностью, определяющей сероцветный геохимический тип отложений, так и крупным растительным детритом размером до 1 см. Это растительное органическое вещество имеет сингенетическое происхождение (Кисляков, Щеточкин, 2000), а степень его преобразованности и сохранности зависит от возраста рудовмещающих пород. Накопление рудовмещающих пород происходило здесь в гумидных климатических обстановках, что обуславливало формирование большого количества растительной массы (Страхов, 1960).

Нами рассматриваются особенности геологического строения и условия накопления урановой минерализации на гидрогенных месторождениях России, относящихся к базальному подтипу песчаниковых месторождений. Географическое расположение урановорудных районов представлено на Рисунок 2.1, а сводные геологические разрезы изученных объектов на Рисунок 2.2.

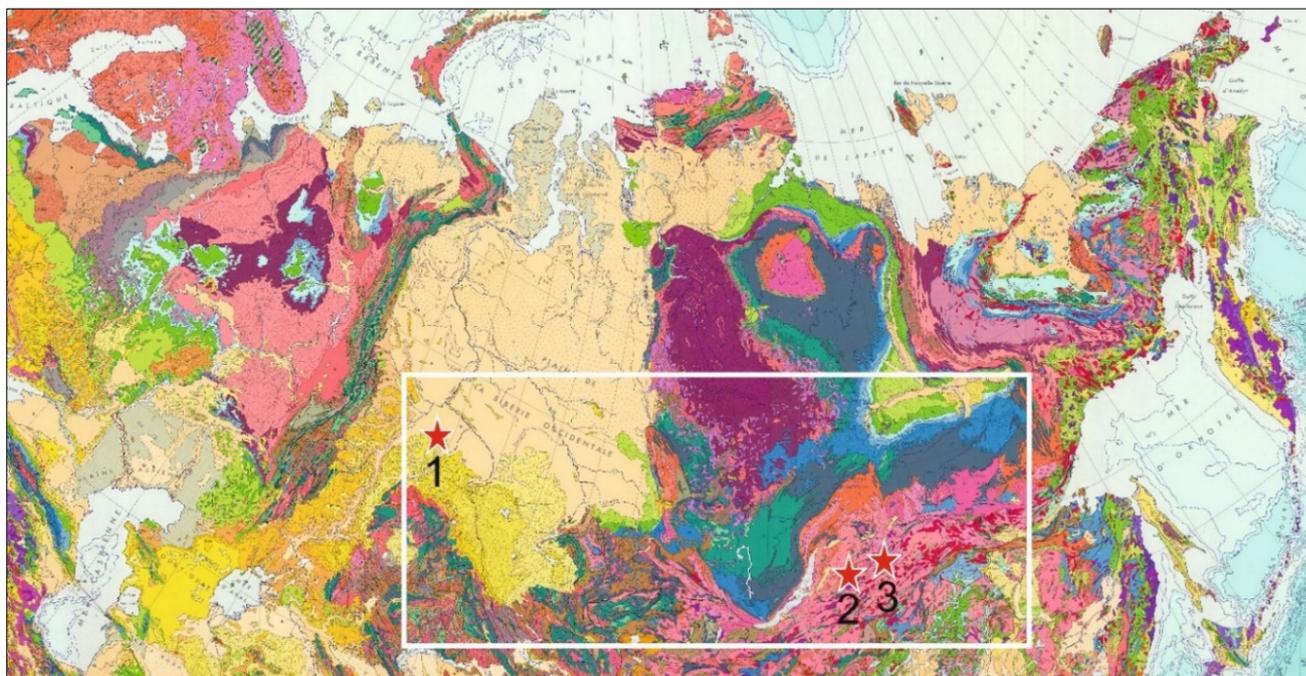


Рисунок 2.1 Расположение урановорудных районов, рассматриваемых в работе. Фрагмент карты РФ. масштаба 1:5 000 000 (ВСЕГЕИ).

1 – Зауральский УРР, 2 – Витимский УРР, 3 – Витимо-Каренгский район

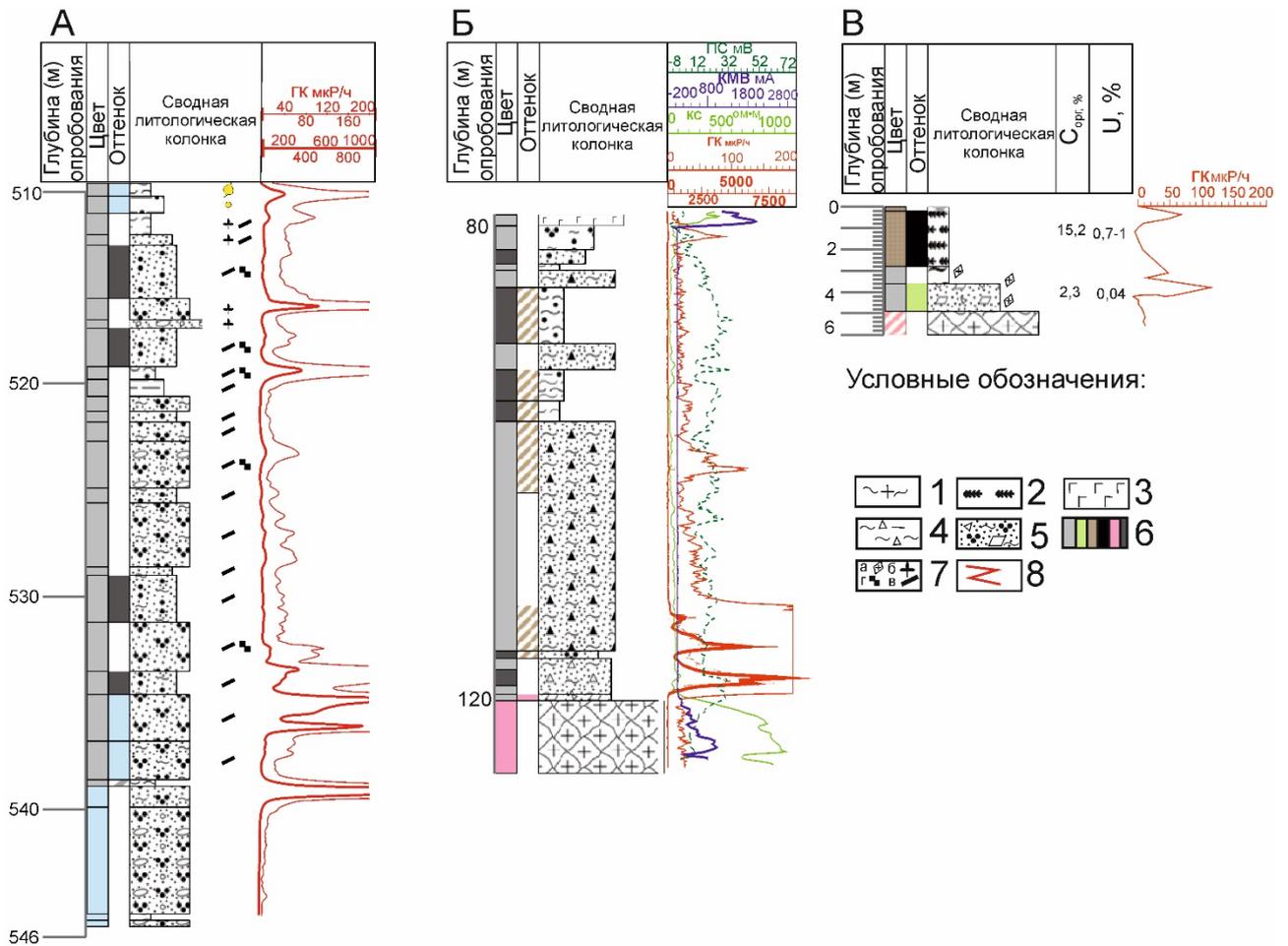


Рисунок 2.2 Сводные, типовые геологические разрезы по изучаемым объектам.

А – Зауральский район; Б – Витимский район; В – Витимо-Каренгский район.

1 – кора выветривания по гранитам; 2 – торфяно-почвенные отложения; 3 – базальты; 4 – древесно-щепнистые породы; 5 – песчано-глинистые породы; 6 – цвета рудовмещающих пород (серый, зеленый, коричневый, черный, розовый, тесно-серый); 7 – примеси в рудовмещающих породах (а – обломки гранитов, б – углефицированный растительный детрит. Крупный (>1 см); в – растительный детрит мелкий (< 1 см), г – конкреции пирита) 8 – график гамма-каротажа

2.1. Геологическое строение урановых рудопроявлений Витимо-Каренгского района

Малое месторождение Оргочи и рудопроявления Витимо-Каренгского района, согласно классификации МАГАТЭ (Geological ..., 2018; Surficial ..., 1988), относятся к поверхностным месторождениям урана в торфяниках.

Ураноносные торфяники широко распространены на территории гумидной климатической зоны и выявлены в США, Канаде, Финляндии, Швеции, России и других северных странах. Все известные объекты подобного типа характеризуются небольшими масштабами с запасами порядка 100 т (Криолитогенез ..., 2011; Пешков и др., 2015; Миронов и др., 2015), но компактным расположением отдельных залежей, в результате чего запасы всего рудного поля могут достигать 2–3 тыс. т. Содержание урана в рудах колеблется от 0,01–0,2 до 2–3 % и определяется его концентрацией в грунтовых водах и удаленностью от источника. Для руд

характерен низкий коэффициент радиоактивного равновесия (^{226}Ra к ^{238}U) с резким смещением в сторону урана, что свидетельствует о накоплении урана в современное время. По многочисленным данным, для формирования подобных объектов необходимо сочетание следующих условий: наличие геохимически специализированных пород в области питания, грунтовых ураноносных вод, а также торфяно-почвенных отложений, обеспечивающих сорбцию урана. Несмотря на то, что подобные объекты в настоящее время не разрабатываются, они представляют интерес с точки зрения изучения процессов накопления первичных концентраций урана в поверхностных условиях на стадии формирования осадка, т.е. на стадии седиментогенеза (Страхов, 1960).

На территории России ураноносные торфяники встречаются на Балтийском щите, в Предуралье (Тешинское и Каринское), в Зауралье (Санарское), а также в пределах Забайкальского региона (Витимо-Каренгские объекты) (Уран ..., 2010). Достаточно хорошо изученным является Санарское месторождение (Челябинская область), где урановое оруденение локализовано в сероцветных песчано-глинистых отложениях надпойменной террасы древнечетвертичного возраста на глубине до 20 м и перекрыто более молодыми отложениями. Содержание урана в рудоносных породах колеблется от 0,03 до 0,6 %. На месторождении была организована опытно-промышленная отработка методом скважинного подземного выщелачивания, в результате чего было добыто порядка 300 т урана. Из-за низких показателей извлечения и экологических проблем добыча урана на месторождении была прекращена (Салтыков, Авдонин, 2017; Салтыков и др., 2018).

Одним из наиболее крупных и изученных районов в России в этом отношении является Витимо-Каренгский (Забайкальский край), где к настоящему времени учитывается малое месторождение Орогочи с забалансовыми запасами урана 426 т, а также ряд разрозненных рудопроявлений (Рисунок 2.3).

Витимо-Каренгский потенциально урановорудный район расположен на севере Забайкальского края, на стыке крупных тектонических структур и относится к зоне раннепротерозойской складчатости, в периферийной части гранитизированного Амалатского выступа, в пределах восточной окраины Саяно-Байкальской складчатой области (Государственная ..., 2010). Урановые накопления локализуются в торфяно-почвенных отложениях пойм рек, как правило, второго-третьего порядка, в пределах геохимически специализированных на уран интрузивов гранитного состава. В результате поисковых и оценочных работ выявлены многочисленные рудопроявления, а также малое забалансовое месторождение Орогочинское (Рисунок 2.3, Рисунок 2.4), расположенное на левом берегу реки, врезанной в массив мезозойских (триасовых) гранитоидов амананского комплекса. Рудные залежи непосредственно локализуются на гранитных массивах.

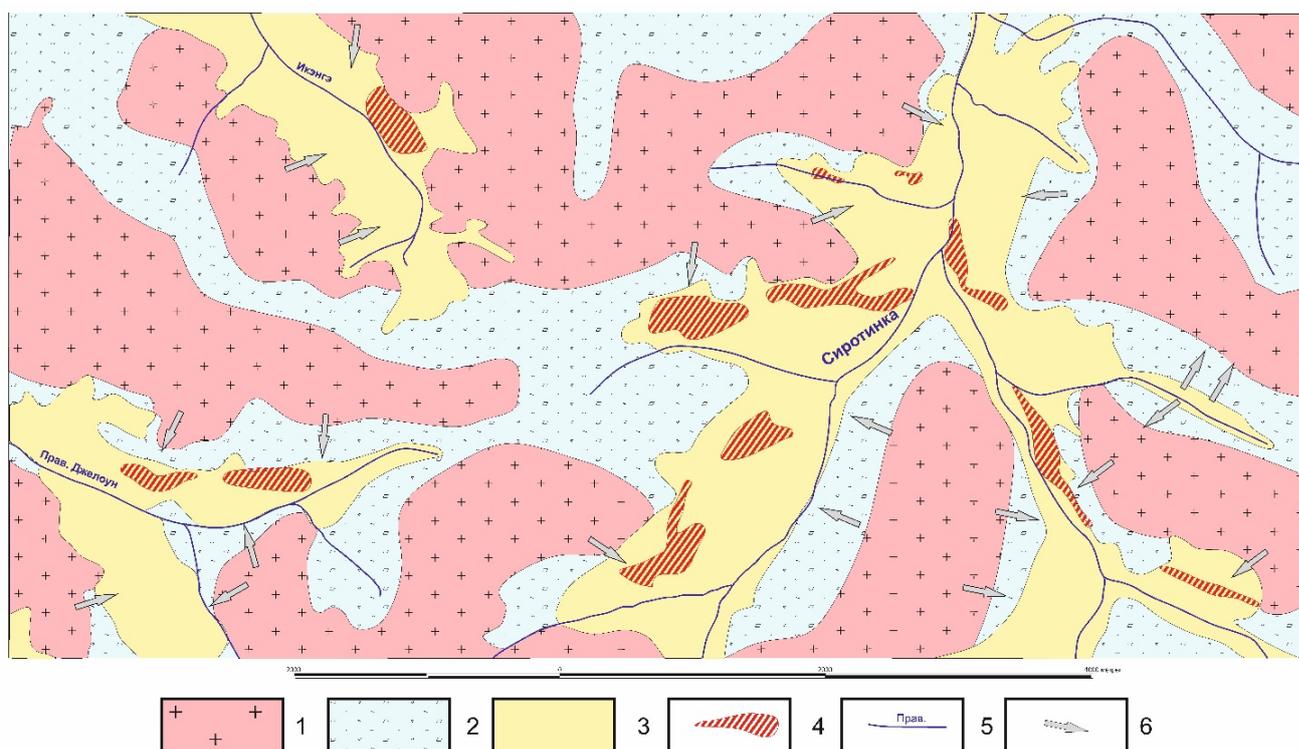


Рисунок 2.3 Типовая геологическая карта рудопроявлений Витимо-Каренгского района, по данным АО «Урангео» (с дополнением автора).

1 – геохимически специализированные на уран породы фундамента; 2 – кора выветривания по гранитам фундамента; 3 – современные торфяно-почвенные отложения пойм; 4 – отдельные приповерхностные рудные залежи; 5 – современные реки и их названия; 6 – направление областей сноса

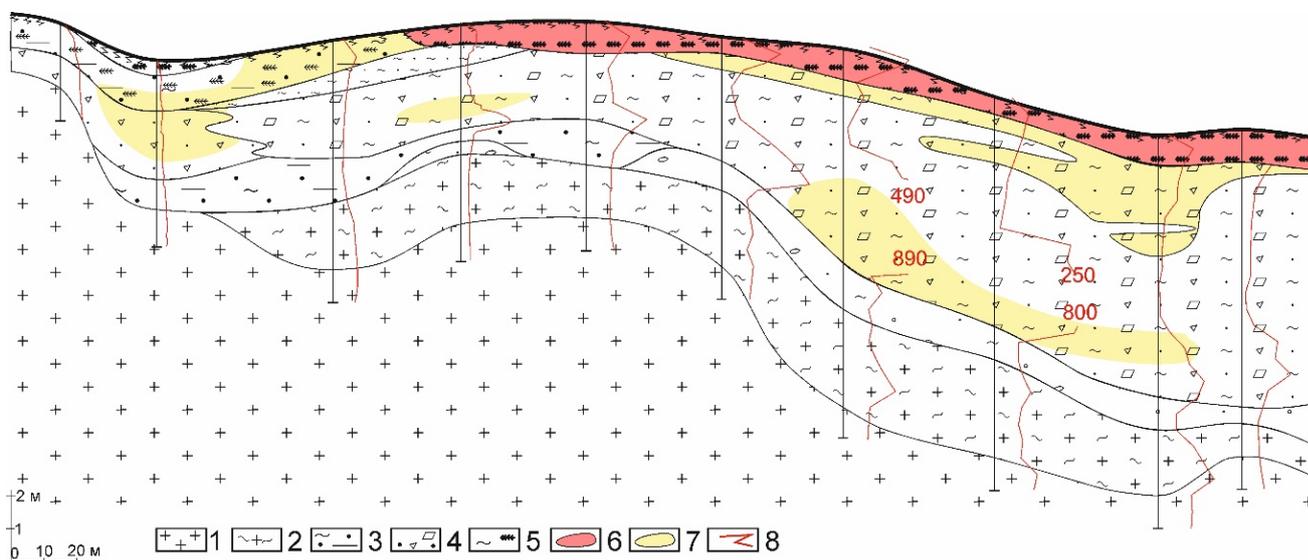


Рисунок 2.4 Типовой разрез рудопроявлений Витимо-Каренгского района.

1 – геохимически специализированные на уран породы фундамента; 2 – кора выветривания по гранитам фундамента; 3 – алеврито-глинистые породы; 4 – дресвяно-щебнистые отложения; 5 – торфяно-почвенные отложения; 6 – рудные залежи; 7 – зона распространения окисленных пород; 8 – графики гамма-каротажа

В геологическом строении региона принимают участие следующие комплексы пород: геохимически специализированные на уран граниты фундамента; каолинит-сметитовая кора

выветривания по гранитам; дресвяно-щебнистые отложения с песчано-глинистым цементом; торфяно-почвенные отложения, развитые в кровле осадочного разреза.

Массивы интрузивов, на поверхности которых локализуются рудные залежи, сложены гранитоидами амананского (μP_{2a1} или $T?a$) и орекитканского комплексов ($T-J_{1or}$). Месторождение Орогочи приурочено к массиву амананских гранитов, ранее относимых к триасовому времени, в настоящее время к – верхнему палеозою. Массивы преимущественно монзонит-гранитового состава, размером 1000–1200 км², изометричной или слабо удлинённой формы. В строении амананского комплекса выделяются три фазы, наибольшей радиоактивностью характеризуются породы третьей фазы. В АГС полях к массивам третьей фазы приурочены повышенные значения Th и K, благодаря чему были выявлены рудопроявления. Орогочинский массив, сложенный третьей фазой амананских гранитов, имеет размеры до 300 м².

Граниты фундамента являются лейкократовыми, геохимически специализированными на уран, с повышенной радиоактивностью до 35–45 мкР/час, содержание урана в них колеблется от 5 до 15×10^{-4} %. Гранитоиды также характеризуются повышенным содержанием тория, молибдена и редких металлов. Акцессорные минералы представлены магнетитом, сфеном, радиоактивным цирконом, апатитом, монацитом.

Кора выветривания по гранитам сформирована в период отсутствия тектонической активности в кайнозойское время и представлена преимущественно дезинтегрированной частью, мощностью 1–2 м, радиоактивностью до 40 мкР/час. Обломочная часть коры выветривания представлена желтовато-бурыми разностями кварц-полевошпатового состава. При накоплении отложений коры выветривания происходило обогащение акцессорными минералами, а также выщелачивание урана и сопутствующих элементов.

Непосредственно основание осадочного разреза сложено коллювиально-делювиальными накоплениями, представленными буровато-желтыми дресвяно-щебнистыми отложениями в песчано-глинистом цементе. Состав обломков отражает состав фундамента, присутствуют как литокласты гранитов, так и отдельные зерна кварца и полевых шпатов, обломки преимущественно неокатанные. Мощность колеблется от 2 до 5 метров, радиоактивность колеблется от фоновой до 30 мкР/час. Содержание урана составляет от 0,00n до 0,01 %.

Верхняя часть осадочного разреза представлена торфяно-почвенными, песчано-илистыми обводненными отложениями, обогащёнными растительным органическим веществом. Мощность колеблется от 1 до 5 м, а радиоактивность не превышает 20 мкР/час, а в отдельных закопушках может достигать 120 мкР/час. Содержание урана в среднем составляет 0,07 %, максимально достигая 2,7 %. В долинах рек распространены современные аллювиальные отложения, представленные галечниками, гравийниками и песками.

Повышенные урановые концентрации приурочены к двум стратиграфическим уровням: верхнему слою, представленному торфяно-почвенными отложениями с поверхности до глубины около 2 м, и нижнему (погребенному), сложенному дресвяно-щебнистыми отложениями коры выветривания с незначительными содержаниями органического вещества на глубинах около 6 м. Химический состав торфяно-почвенных руд характеризуется присутствием следующих элементов (масс. %): U – 0,68, Mo – 0,01, C_{орг.} – 15,28, Fe₂O₃ общ. – 2,27, FeO – 1,41, а суглинисто-дресвяные – U – 0,091, Mo – 0,0021, C_{орг.} – 2,31, Fe₂O₃ общ. – 0,94, FeO – 0,84. Сопоставительный анализ химического состава поверхностных и погребенных разностей руд показывает, что в обогащенных органикой поверхностных рудах существенно увеличиваются: C_{орг.} – более чем в 7 раз, Mo – на порядок, Fe₂O₃ общ. – более чем в 2 раза, FeO (закисное) – в 1,5 раза, а также незначительно (на первые проценты) возрастают содержания S и CaO (Рисунок 2.5) (Холодов, 2020; Перельман, 1972; Коченов, Расулова, 1978).

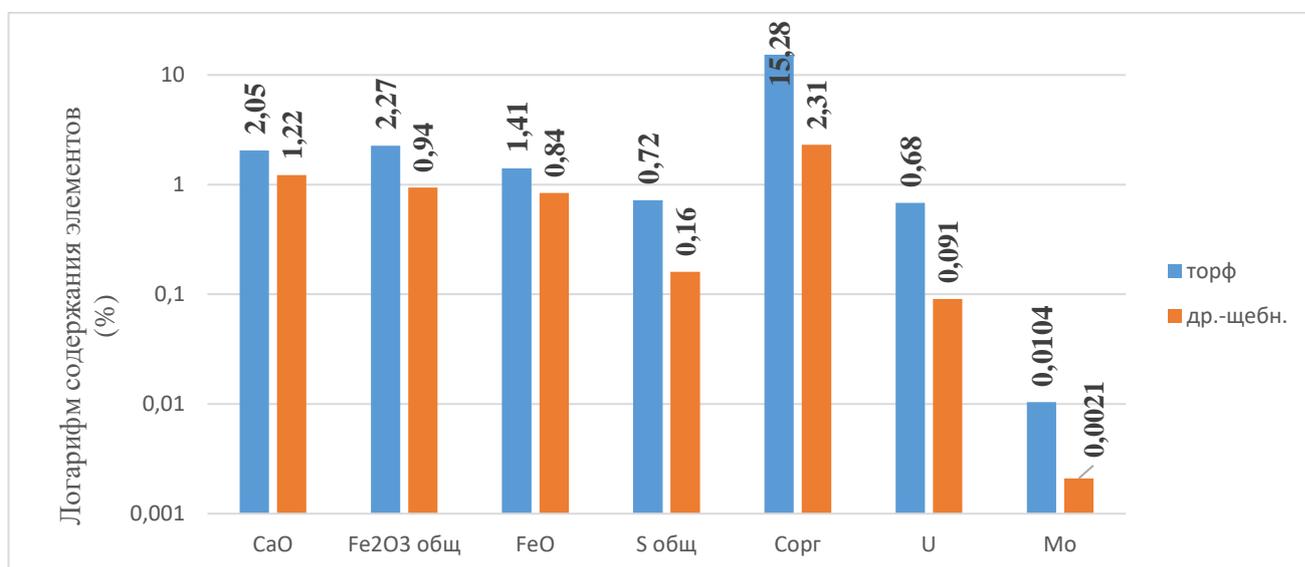


Рисунок 2.5 Диаграмма распределения элементов в комбинированных пробах торфяно-почвенных и дресвяно-щебнистых отложений рудопроявления Орогочи.

Отмечается прямая корреляция между содержаниями органического вещества и урана. Руды, обогащенные растительным детритом и ураном, характеризуются высокими значениями потерь при прокаливании, достигающими 46 и более процентов, что связано главным образом с присутствием в пробах органики (~15 %). Руды различаются и по количественным соотношениям породообразующих компонентов. Дресвяно-щебнистые отложения характеризуются стандартным содержанием породообразующих элементов (%): SiO₂ (71,5), Al₂O₃ (13,8), Na₂O (2,3), K₂O (5,5). В торфяно-почвенных их концентрация уменьшается минимум в два раза (%): SiO₂ (36,6), Al₂O₃ (9), Na₂O (0,68), K₂O (1,98), но при этом увеличивается количество (%) MgO (0,69), P₂O₅ (0,23), CaO (3,56), S (1,34), TiO (0,33). Также два типа оруденения отличаются радиоизотопными соотношениями. Для погребенных типов руд, связанных с корой выветривания гранитов, коэффициент радиоактивного равновесия (КРР),

рассчитываемый как отношение радия (^{226}Ra) к урану (^{238}U), составляет приблизительно 1, что характерно для руд с установившимся радиоактивным равновесием (Радиоизотопные ..., 2015). Повышенные содержания урана в погребенных рудах обусловлены акцессорным накоплением минералов тяжелой фракции в коре выветривания и не связаны с инфильтрационными рудоформирующими процессами.

Для поверхностного оруденения значения КРР значительно меньше единицы и колеблются в пределах от 0,025 до 0,099. Величина отношения ^{230}Th (I₀) к ^{238}U также менее единицы (0,1) (Сащенко и др., 2018). В то же время коэффициент γ ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) значительно выше единицы (1,7). Таким образом, во всех исследуемых пробах наблюдаются аномально высокие активности материнского ^{238}U , с недостатком дочерних продуктов распада и высокой степенью эманирования ^{222}Rn , характерным для молодых отложений со слабо сформированной минеральной матрицей. Такие параметры характерны для ситуаций современного привноса урана грунтовыми водами и его осаждения. Вычисленное на основании соотношений $^{230}\text{Th} / ^{238}\text{U}$ и $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ время поступления урана в почвенный слой составляет ориентировочно 5–10 тыс. лет, значения активности ^{230}Th и ^{226}Ra находятся в пределах аналитической погрешности, что свидетельствует о возрасте пробы не менее 5–7 тыс. лет (Сащенко и др., 2018). Высокое значение соотношения $^{230}\text{Th}/^{228}\text{Th}$ (3,9) характеризует преимущественно урановую природу аномалии. Накопление рудовмещающих отложений и их обогащение ураном в настоящее время происходит практически одновременно.

Рудопроявления с поверхностными рудами представлены отдельными залежами, приуроченными к припойменным частям современных рек, на глубине от поверхности до 2–3 м. Отдельные залежи, оконтуренные по бортовому содержанию 0,01 %, имеют овальную или удлиненную форму, длину до 1 км, ширину от 350 до 750 м, содержание урана в них изменяется от 0,07 до 0,52 %, в среднем составляя 0,01 % на мощность от 0,5 до 4 м. Богатое оруденение сосредоточено в основном в центральной части лентовидных залежей и приурочено к участкам, наиболее обогащенным растительным органическим веществом.

Урановое оруденение приурочено к растительным остаткам начальной стадии гумификации. Концентрации урана диагностируются на поверхности растительного детрита и глинистых минералов. Формирование рудовмещающих отложений на данный момент не завершено, происходит в условиях резко континентального гумидного климата, в зоне развития многолетнемерзлых пород.

Накопление урановых концентраций в торфяно-почвенных отложениях Витимо-Каренгского района связано с поступлением ураноносных вод и последующей сорбцией урана на растительном детрите. Источником урана и сопутствующих элементов, преимущественно редкоземельных, являются геохимически специализированные граниты фундамента,

претерпевшие процессы корообразования. Учитывая поверхностное расположение рудовмещающих отложений, их обводненность, современный возраст оруденения, можно сделать вывод о том, что формирование урана происходит в стадию *седиментогенеза*.

2.2. Геологическое строение месторождений Витимского района

Витимский урановорудный район включает серию однотипных гидrogenных месторождений песчаникового типа (Geological ..., 2018), в том числе наиболее хорошо изученные месторождения Хиагдинского рудного поля (Рисунок 2.6) (Витимский ..., 2015; Дойникова и др., 2018; Никитина, Прохоров, 2012а, 2012б; Тарханова, Прохоров, 2017; Пешков и др., 1993 Ф).

Район расположен в центральной части Забайкалья, в Баунтовском районе республики Бурятия. Был открыт в 1970–1980 гг. сотрудниками Сосновской экспедиции, в дальнейшем в изучении района принимали активное участие коллективы ВИМСа, ИГЕМа, ВНИИХТа, а также Русбурмаша. В настоящее время часть месторождений обрабатывается СПВ (Хиагдинское, Источное, Вершинное, Количиканское), часть подготавливается к освоению (Дыбрынское и другие). Витимский район является единственным в мире, где применяют технологии скважинного подземного выщелачивания в условиях многолетней мерзлоты (Добыча ..., 2022). В районе сохраняются перспективы расширения минерально-сырьевой базы за счет проведения поисковых работ в краевых частях.

Витимский УРР, расположенный в краевой части Байкало-Витимской складчатой системы, характеризуется сложно-блоковым строением, что обусловлено проявлением многочисленных геотектонических циклов от байкальского до альпийского (Государственная ..., 2011). В альпийский этап тектоно-магматической активизации региона было сформировано Витимское базальтовое плато, перекрывающее рудовмещающие неогеновые отложения. Плато базальтов является частью Байкальской рифтовой системы и имеет северо-восточную ориентировку. Формирование плато происходило в результате неоднократных длительных излияний нескольких вулканических центров. В результате структура Витимского плато представлена ярусами (пакетами) базальтовых лав мощностью от 2 до 400 м. По данным К-Аг датировки базальтов, их возраст колеблется от 14 до 0,6 млн лет. Под лавами Витимского плато погребена речная сеть, представленная тремя стволowymi долинами первого порядка и притоками второго-третьего порядка (Витимский ..., 2015). Основные месторождения урана приурочены к осевым поднятиям – Байсыханскому и Центральному. Урановорудные тела в основном выявлены в боковых притоках 2–3 порядка, за исключением Дыбрынского месторождения, локализованного в стволowej Аталангинской палеодолине. Палеоврезы имеют относительно небольшие размеры длиной 3–10 км при ширине 0,3–1,5 км.

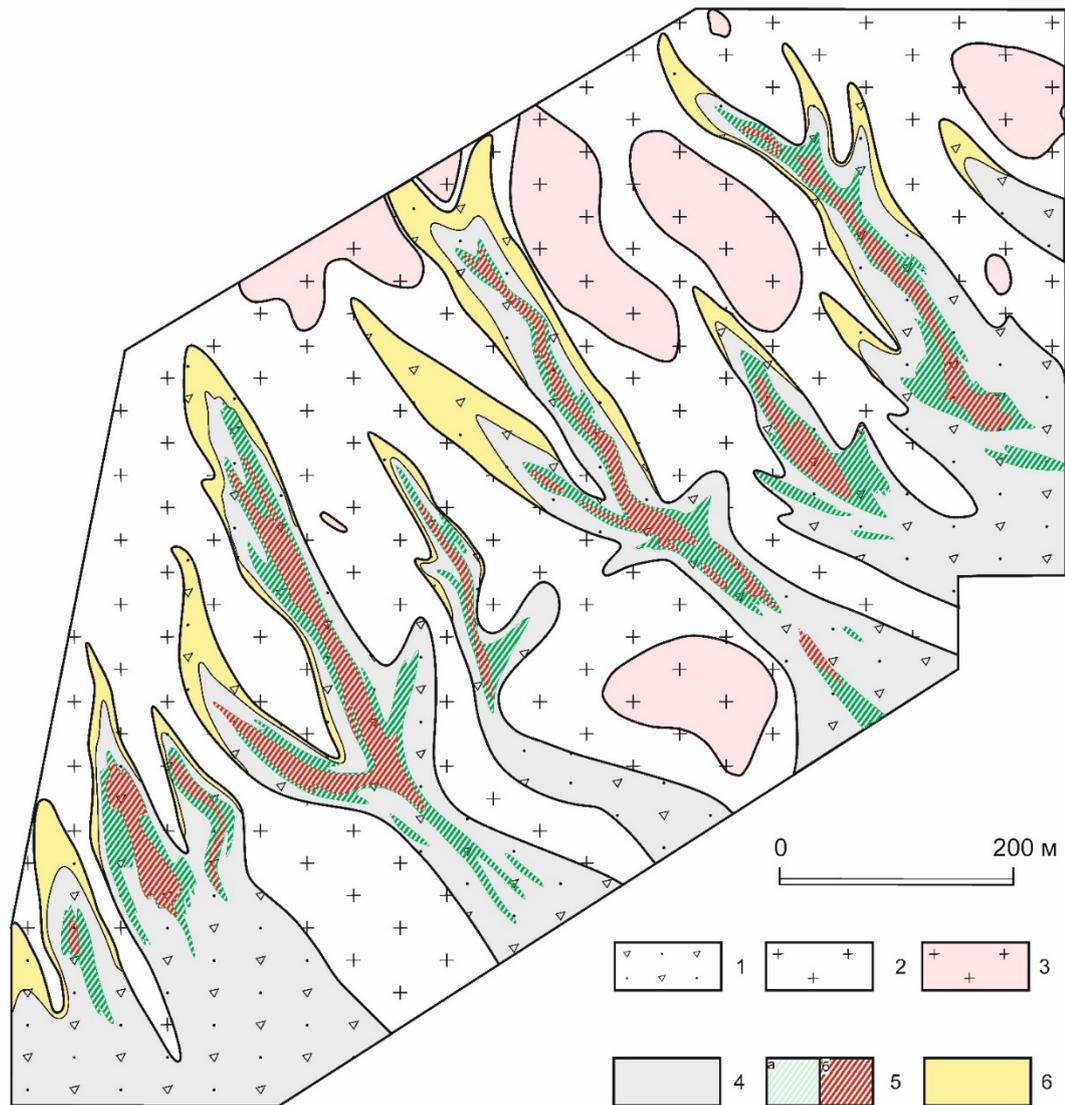


Рисунок 2.6 Геологическая схема Хиагдинского месторождения, по данным БФ «Сосновгеология» и ФГБУ «ВИМС».

1 – несортированные древесно-щепнистые отложения джилдинской свиты; 2 – граниты фундамента; 3 – специализированные граниты фундамента (Витимканский комплекс); 4 – область распространения отложений сероцветного геохимического типа; 5 – область локализации уранового оруденения: а – забалансовые содержания, б – балансовые содержания; б – область распространения отложений желтоцветного геохимического типа

В геологическом строении района принимают образования от протерозойского до современного возраста: породы фундамента протерозой-палеозойского возраста, образования коры выветривания мел-палеогенового возраста, рудовмещающие песчано-глинистые отложения джилдинской свиты неогена, плато-базальты неоген-четвертичного возраста (Рисунок 2.7, построен по данным БФ «Сосновгеология» (Пешков и др., 1993 Ф) и ФГБУ «ВИМС» (Коченов и др., 1989 Ф)).

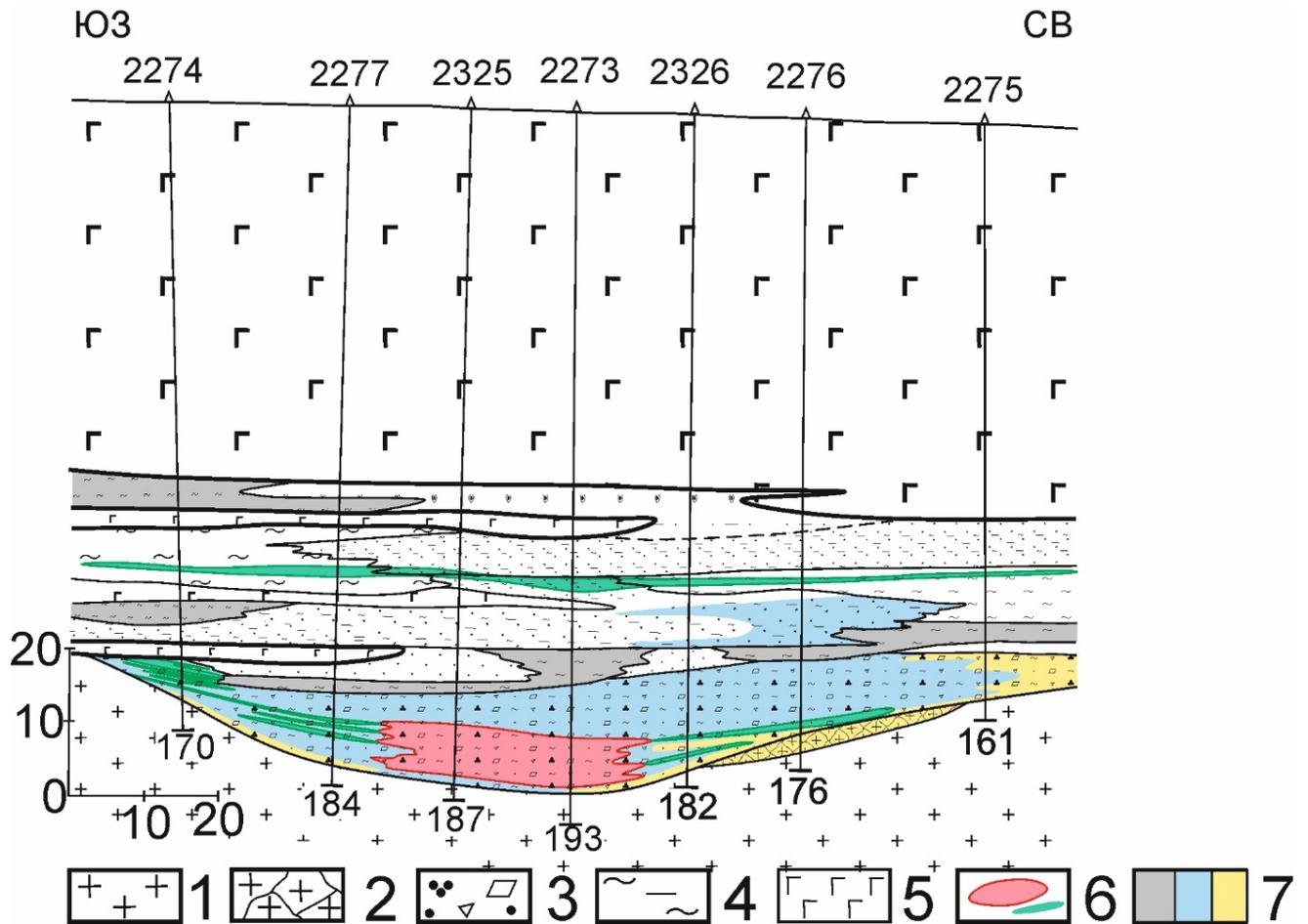


Рисунок 2.7 Схематический геологический разрез месторождения Хиагдинского рудного поля.

Условные обозначения: 1 – граниты фундамента; 2 – дезинтегрированная кора выветривания; 3 – дресвяно-песчано-щебнистые отложения; 4 – алеврито-глинистые породы; 5 – базальты; 6 – рудные залежи, красные с балансовым оруденением, зеленые – с забалансовым; 7 – геохимические типы пород: серый – сероцветные и черноцветные, белый – восстановленные породы; желтый – окисленные породы

Породы фундамента представлены разнообразными по составу комплексами пород протерозой-палеозойского возраста. Преимущественное распространение получили интрузивные образования, представленные протерозойским баргузинским (PR_{2b}) и палеозойским витимканским (γC_{2-3v}) комплексами гранитоидов. Подчиненное значение имеют сланцы и мраморизованные известняки.

Граниты фундамента характеризуются повышенными содержаниями урана, наибольшим распространением среди них пользуются граниты витимканского комплекса. Породы представлены биотит-роговообманковыми и среднезернистыми разновидностями, со средним содержанием урана $5,5-6,7 \times 10^{-4} \%$ (Шуршалина и др., 1989), подобные содержания позволяют их относить к геохимически специализированным на уран. В неизмененных гранитах, которые вскрываются единичными скважинами, повышенные содержания урана распределены неравномерно и приурочены в основном к акцессорным минералам – ортиту, циркону, лейкоксенизированному сфену и другим.

Породы фундамента характеризуются высокой изменчивостью и преобразованы процессами донеогенового корообразования, что способствовало переводу урана в подвижную форму.

Содержания урана в измененных гипергенными процессами гранитах на порядок меньше, чем в исходных, что свидетельствует о его выносе. Радиографии образцов гранита с водораздельных участков свидетельствуют о практически полном выносе урана.

Кора выветривания. После мезозойской стадии тектоно-магматической активизации территория испытывала относительно спокойное тектоническое развитие, обусловившее пенепленизацию и создание условий для интенсивного химического выветривания, с концентрацией в тяжелой фракции акцессорных минералов с урановой и редкоземельной минерализацией, с попутным переводом урана в подвижную форму. Длительность тектонического покоя продолжалась с верхнего мела по олигоцен (K_2-P_3), т.е. порядка 70 млн лет. С верхнего мела до эоцена процессы выветривания протекали в условиях аридного, а затем до олигоцена – гумидного климата. Отложения кор выветривания распространены в палеодолинных структурах и имеют линейный характер, при этом практически полностью отсутствуют на водоразделах. По данным бурения выделены два типа кор выветривания – дезинтегрированный и глинистый, при этом полный профиль коры выветривания практически нигде не сохранился. В зависимости от степени проявления гипергенных процессов, отложения коры выветривания имеют желтую, вишнево-красную, оранжевую, белесую и другие окраски. В рудоносных палеодолинах распространена дезинтегрированная часть коры выветривания с содержаниями урана $14,2 \times 10^{-4} \%$, а в безрудных палеодолинах – глинистая с содержаниями урана $2,3 \times 10^{-4} \%$.

В результате эоценовой тектоно-магматической стадии активизации с приподнятых блоков глинистый элювий был смыт и послужил материалом для формирования неогеновых отложений.

Развитие *неогеновых палеодолинных* структур обусловлено эрозионными процессами. В разрезе неоген-четвертичных стратифицированных образований джилдинской свиты выделяют три пачки (подсвиты): нижняя – терригенная, представленная аркозовыми породами, сформированными за счет размыва пород коры выветривания, мощностью до 80 м; средняя – вулканогенно-осадочная, представленная терригенными отложениями с примесью пеплового материала и прослоями диатомей, мощностью до 120 м; верхняя – вулканогенная толща, представленная плато-базальтами. Отложения нижней и средней пачек выполняют систему палеодолин и оперяющих палеораспадов, а верхняя слагает перекрывающий базальтовый покров.

Нижняя терригенная пачка (N_1dz_1) характеризуется разнообразным литологическим составом. Среди пород выделяются дресвяно-щебнистые и гравийно-галечные образования, песчанистые и глинистые, обогащенные растительным органическим веществом. Породы неравномерно насыщены углефицированными растительными остатками, представленными как мелким детритом, так и крупными остатками стеблей и листьев, в результате чего количество $S_{орг}$ может достигать 35–40, в среднем составляя 3–5 %. По данным споро-пыльцевого анализа, палинокомплекс отложений отвечает широколиственной тайге, и его возраст определяется как 13–14 млн лет, что соответствует миоценовому времени (Расказов и др., 2007). В основном промышленное урановое оруденение приурочено к базальным частям осадочного разреза, т.е. к основанию нижней пачки.

Средняя вулканогенно-осадочная пачка (N_1dz_2) сложена озерными диатомитами, ленточными глинами, туфами, туффитами, туфопесчаниками с единичными прослоями базальтов. В осадках диагностируется пепловый и лапиллиевый материал, по наличию которого проводится граница с нижележащей пачкой. На склонах распадков отложения представлены несортированными дресвяно-песчанистыми, щебнисто-дресвянистыми и алеврито-глинистыми разностями с примесью пепла и обломков базальтов. Дресва и щебень представлены обломками гранитов, песчаный материал – кварцем и полевыми шпатами, а глинистый матрикс – каолинит-гидрослюдистого состава с монтмориллонитом. Отложения преимущественно сероцветные, за счет обогащения углефицированным растительным детритом, и характеризуются высокой восстановительной способностью. По данным палеонтологических исследований и K-Ar датирования лав, возраст отложений определен как 9–12 млн (миоцен). На части месторождений (Намару, Коретконде) урановое оруденение локализуется в вулканогенно-осадочных отложениях.

Верхняя вулканогенная пачка (βN_1dz-Q) сложена многочисленными покровами базальтов суммарной мощностью до 400 м. Многочисленными измерениями установлено, что на различных участках возраст базальтов колеблется в широком возрастном диапазоне (Государственная ..., 2011; Биостратиграфия ..., 2007; Кайнозойские ..., 1983).

Отдельные рудные залежи локализуются в тальвеговых частях палеораспадков на глубинах от 10 до 300 м. Часть залежей смещена пострудными разломами северо-восточного простирания – Кореткондинским, Хиагдинским и Иранским. Вертикальный размах по разломам составляет от первых метров до 130 м. Системы разломов создают мозаично-блоковую структуру, что определяет ориентировку системы палеодолин и притоков. Залежи имеют лентообразную либо линзовидную форму в разрезе, протяженность от 0,8 до 4 км при ширине от 0,2 до 0,8 км и залегают согласно напластованию осадочных пород. Мощность рудной части разреза от первых сантиметров до 25 метров, оруденение развито неравномерно и

макроскопически не определяется. Содержание урана колеблется от кларковых значений в безрудной части до первых процентов в рудной зоне. Интервалы с аномальным содержанием урана приурочены к наиболее глинистым частям разреза, обогащенным углефицированным растительным детритом. Положение и морфология окислительно-восстановительной зоны определяется в том числе и литологическим составом рудовмещающих пород. Первичное оруденение формировалось при последовательном развитии инфильтрационных процессов вплоть до перекрытия рудовмещающего горизонта базальтами.

В последнее время И.Н. Солодов освещает роль углекислых подземных вод в рудосохранении уранового оруденения (Солодов, Нестерова, 2022). По мнению автора, плато-базальты и многолетнемерзлые породы не являются полностью водоупором, в результате чего происходит современная инфильтрация метеогенных вод.

Урановое оруденение представлено тонкодисперсными выделениями, изучение которых возможно только прецизионными методами. Урановые концентрации локализуются в различных терригенных породах – светлых и темных песках, алевритах и глинах, в единичных случаях – в гранитах и базальтах. Рудная минерализация развита по обломочным зернам лейкоксенизированных титанатов, по трещинам полевых шпатов. При этом основная масса рудного вещества приурочена к глинистому цементу, в том числе развивается и по растительному детриту. По результатам детальных минералогических исследований, преимущественно ВИМСа и ИГЕМа (Особенности ..., 2014; Тарханова, Прохоров, 2017; Сашенко и др., 2022; Дойникова и др., 2016; Дойникова и др., 2018), урановая минерализация представлена нингиоитом или плохо раскристаллизованными гелями аналогичного состава. Характерной особенностью является микронная размерность нингиоита, несовершенство его выделений, большое количество примесей. В богатых рудах Хиагдинского месторождения была также диагностирована оксидная форма урановой минерализации, представленная настураном и скупитом (Дойникова и др., 2018; Винокуров и др., 2017). Состав примесей зависит от геохимической специализации материнских гранитов, непосредственно в рудном веществе обнаруживаются редкие земли и другие элементы.

Многочисленные исследования изотопных соотношений в рудах месторождений Хиагдинского рудного поля показали длительность формирования урановой минерализации, а также наличие современных процессов преобразования урановых руд (Поведение ..., 2016; Полигенность ... 2017; U-Pb системы ..., 2013; Пострудные ..., 2021). Для рудных проб на месторождении Дыбрыньское, согласно значениям U-Pb соотношений (U-Pb системы ..., 2013), установлен возраст уранообразования в 6,5–12 млн лет, что свидетельствует о длительности процесса миграции радионуклидов. Изучение распределений урана в разных фракциях подтверждает приуроченность урана к тонкой (глинистой) фракции. Таким образом, как по

геологическим (Тарханова, Прохоров, 2018), так и по геохронологическим данным (U-Pb системы ..., 2013; Поведение ..., 2016), формирование урановой минерализации началось в условиях седиментогенеза (12 млн лет назад, миоцен), т.е. до перекрытия отложений покровами базальтов, и продолжалось достаточно продолжительное время, до плиоцена включительно. Также, по данным геохронологических исследований, отмечаются проявления современных перераспределений урана (Поведение ..., 2016).

Формирование оруденения в пределах Витимского урановорудного района связано с инфильтрацией урансодержащих кислородных вод и накоплением урана в восстановительных условиях. Источником урана являются геохимически специализированные породы фундамента, преобразованные процессами донеогенового корообразования, что привело к его переводу в подвижную форму. Создание урановых концентраций началось непосредственно на этапе накопления осадка (седиментогенез), продолжилось в стадию формирования породы (диагенез), а также в процессе поступления инфильтрационных урансодержащих вод (эпигенез).

2.3. Геологическое строение Зауральского региона

Зауральский урановорудный район, выявленный коллективом ГП «Зеленогорскгеология», (при этом существенный вклад в изучение ураноносности внесли сотрудники ВИМСа, ИГЕМа, ВНИИХТа и АО «Далур»), расположен в зоне сочленения восточного склона Уральской складчатой зоны и Западно-Сибирской палеозойской платформы (Рисунок 2.8) и объединяет экзогенно-эпигенетические песчаниковые месторождения на юге Курганской области (Далматовское (Рисунок 2.9Рисунок 2.10), Хохловское и Добровольное) и в пограничных районах Республики Казахстан (Тобольское и Сенжарское). Месторождения относятся к песчаниковому типу в базальных палеодолинах и приурочены к верховьям разветвлённой системы палеодолин, истоки которых расположены в пределах Уральского хребта. Урановое оруденение локализуется в аллювиальных отложениях позднеюрского возраста в зоне выклинивания пластового окисления. Месторождения отрабатываются методом скважинного подземного выщелачивания (Халезов, 2009, 2017, 2018; Мезенов и др., 1994 Ф; Самоочищение ..., 2022; Дойникова и др., 2009; Уран ..., 2010).

В геологическом строении выделяются два структурных этажа: нижний, представленный дислоцированными породами фундамента, и верхний, сложенный мезозойско-кайнозойскими осадочными слаболитифицированными породами.

Породы нижнего структурного этажа, которые являются складчатым фундаментом, сформировались в результате нескольких стадий тектонической активизации, преимущественно каледонской и герцинской. Поверхность погребенного складчатого фундамента образует

региональный ступенчатый склон, осложненный серией положительных и отрицательных пликативных структур.

Складчатый фундамент сложен осадочными породами позднего палеозоя (S-C), представленными преимущественно углеродистыми сланцами, песчаниками, известняками с прослоями вулканогенных пород, туфопесчаниками. Довольно часто породы прорваны палеозойскими интрузиями кислого состава. В частности, в верховьях Хохловской палеодолины вскрыт верхнепалеозойский гранитный массив. На палеозойских породах фундамента с угловым несогласием залегают вулканогенные образования челябинской серии нижнего-среднего триаса, представленные базальтами, липаритами. Содержание урана в липаритах на Хохловском месторождении достигает $n \cdot 10^{-3} \%$ (Рудоконтролирующая ..., 2002). Породы верхнего триаса характеризуются фоновыми содержаниями урана 7,3–17 г/т, но отмечаются повышенные концентрации иттрия и редких земель до 65–130 г/т.

На водораздельных пространствах не происходило накопление осадков, в их пределах шло активное корообразование. Широкое развитие химических кор выветривания способствовало переводу урана в подвижную форму и вовлечению его в миграцию. В основном это относится к изверженным породам кислого состава с повышенными фоновыми содержаниями урана. Во время корообразования климат региона был засушливый, близкий к аридному, что приводило к формированию красноцветных пород. Начиная с конца среднего триаса до средней юры климат был умеренно теплым и влажным, о чем свидетельствуют интенсивное угленакопление и обилие растительных остатков и прослоев лигнитов.

Платформенный этап развития продолжался со средней юры до олигоцена включительно, мощность осадочных отложений увеличивается с запада на восток. Отложения средне-позднеюрского возраста таборинской свиты (J_{2-3тб}) заполняют эрозионные палеодолины, врезаемые в породы фундамента. Эрозионные палеодолины образуют разветвленную речную сеть, истоки русел которой расположены на восточном склоне Урала. Глубина вреза в среднем составляет приблизительно 150 м, ширина 2–5 км, в верховьях – не более 1 км, в средней части – до 4–5 км. Морфология отдельных долин, их ориентировка определяются разрывными нарушениями в фундаменте, его литологическим составом, долины имеют извилистый характер.

В строении таборинской свиты выделяют три подсвиты: две нижних, представленных сероцветными аллювиальными ритмами, и верхнюю глинистую пестроцветную.

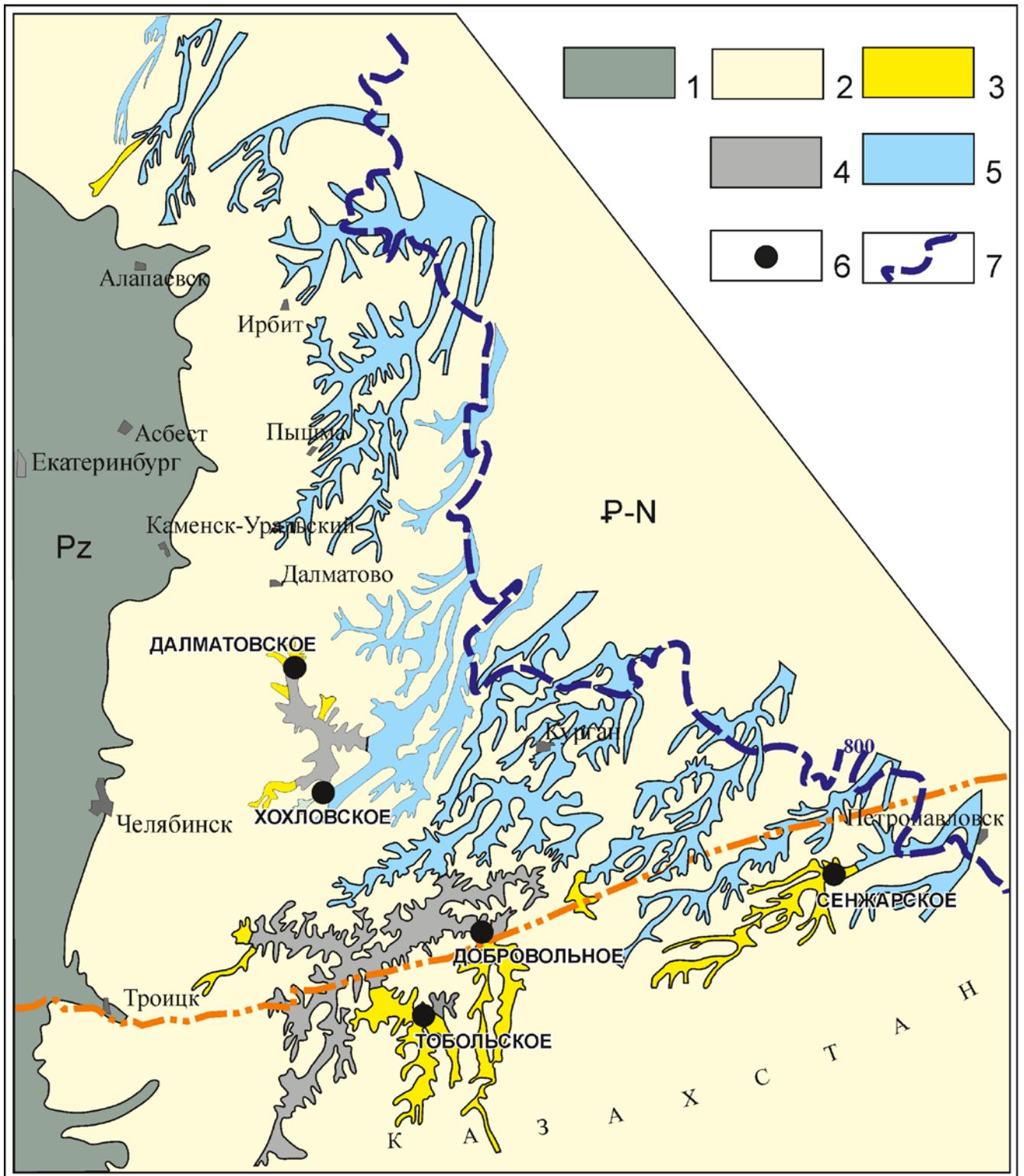


Рисунок 2.8 Геологическая схема Зауральского урановорудного района.

Условные обозначения:

1 – породы складчатого основания; 2 – породы осадочного чехла; 3-5 – позднерурские долины, выполненные: 3 – окисленными породами, 4 – неокисленными породами, 5 – неуставленного типа; 6 – урановые месторождения; 7 – изолиния глубины залегания фундамента 800 м

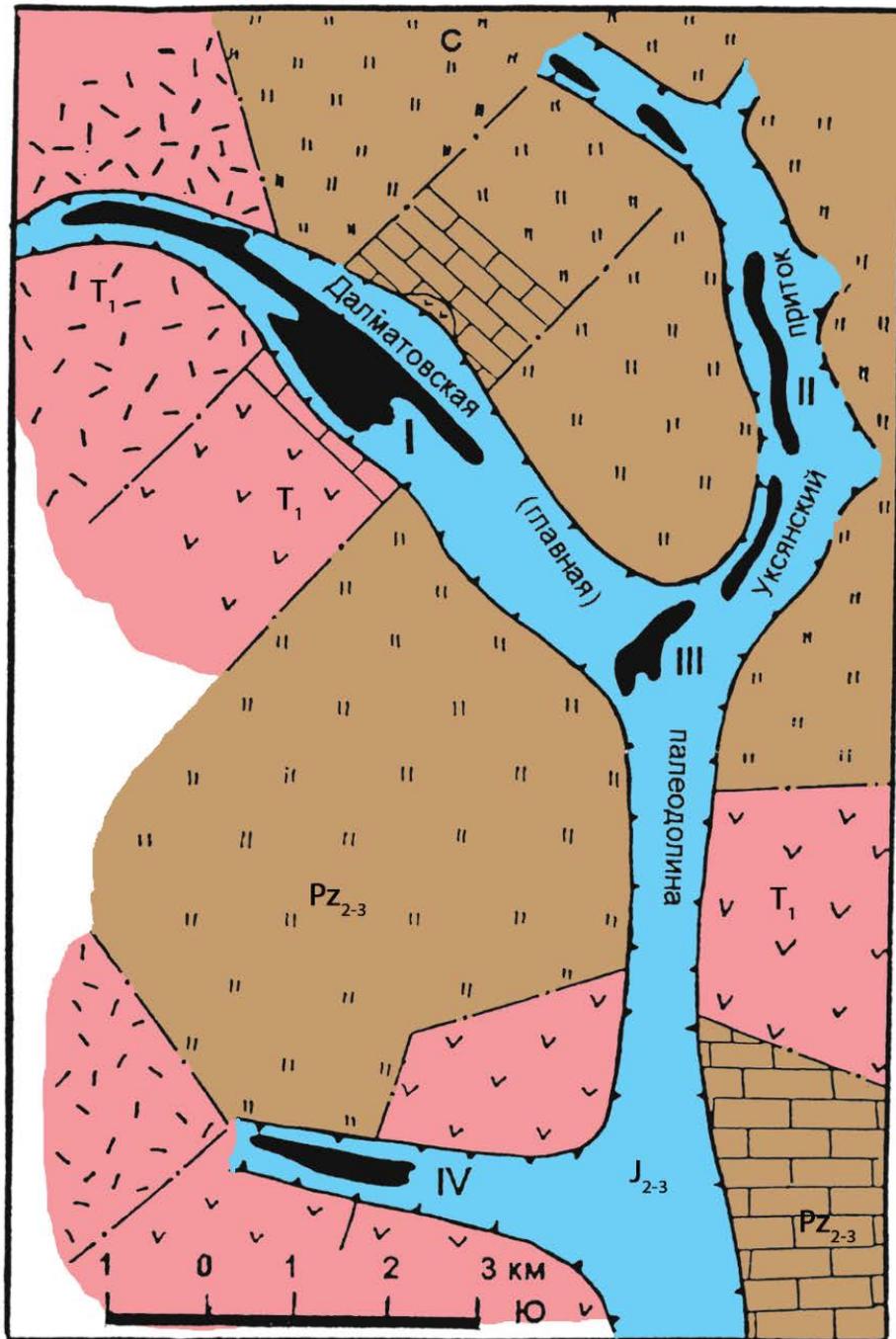


Рисунок 2.9 Схематическая геологическая карта Далматовского месторождения, со снятым чехлом мел-четвертичных пород.

Условные обозначения: 1 – контуры Далматовской системы речных долин розднеюрского возраста; 2 – участки месторождения: I – Центральный, II – Уксянский, III – Усть-Уксянский, IV – Лебяжинское рудопроявление; 3-6 породы фундамента: 3 – липариты (T_1), 4 – базальты (T_1), 5 – слюдистые и глинистые сланцы (PZ_{2-3}), мраморизованные известняки (PZ_{2-3}); 7 – предполагаемые границы пород фундамента

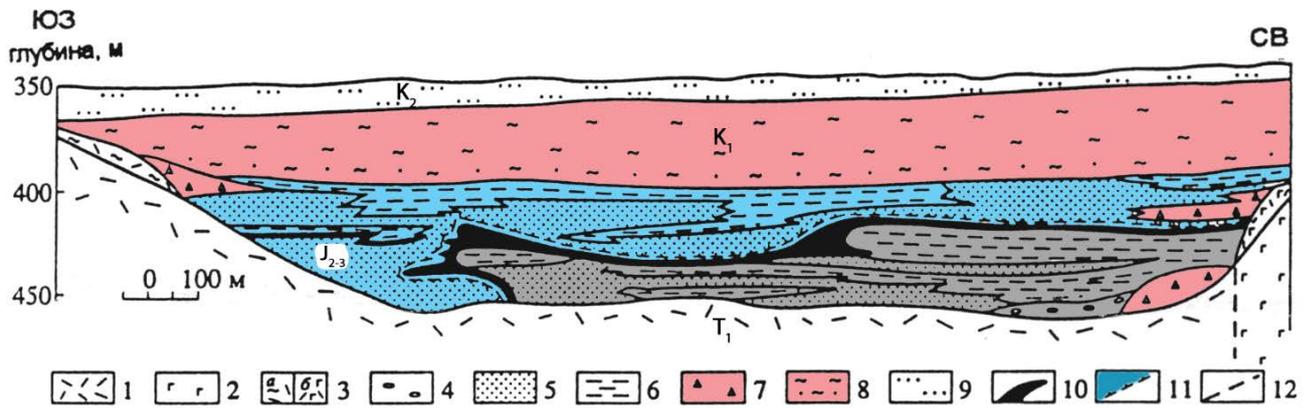


Рисунок 2.10 Геологический разрез Далматовского месторождения по профилю (вышележащие осадочные отложения сняты).

1–3 – породы фундамента (T_1): 1 – липариты, 2 – базальты, 3 – кора выветривания: а – по липаритам, б – по базальтам; 4 – б – сероцветные аллювиальные отложения (J_{2-3}): 4 – галечно-гравийные русловые, 5 – песчаные русловые, 6 – глинисто-алевролитовые пойменные; 7 – гравийно-песчано-глинистые красноцветные отложения конусов выноса; 8 – красноцветные делювиально-пролювиальные и озерные глинисто-песчаные и глинистые отложения (K_1); 9 – песчаные отложения (K_2); 10 – урановое оруденение; 11 – граница древней зоны грунтово-пластового окисления; 12 – тектонические нарушения

Нижние аллювиальные ритмы представлены сероцветными песчано-глинистыми фациями, с характерным уменьшением крупности зерен от подошвы к кровле ритма, обусловленным чередованием русловых и пойменных отложений. Мощность каждого ритма составляет 10–20 м. Основание ритма представлено горизонтом валунно-галечных отложений мощностью 0,2–0,5 м. Выше по разрезу отложения сменяются тонкозернистыми сероцветными породами, в кровле каждого ритма наибольшим распространением пользуются алеврито-глинистые породы. состав обломочного материала кварц-полевошпатовый, степень его окатанности слабая, преобладают угловато-окатанные обломки, также присутствуют мусковит и единичные зерна акцессорных минералов, среди которых преобладают ильменит и лейкоксен, в единичных случаях отмечаются циркон, гранат и сфен. Цемент преимущественно поровый, глинистый, каолинит-гидрослюдистого состава. Первичные породы темно-серые, серые за счет насыщения отложений углефицированным растительным веществом. Таким образом, породы относятся к сероцветному и черноцветному геохимическому типу (Максимова, Шмариович, 1993) с содержанием $C_{орг}$ в среднем 0,39–2,48 %, в черноцветных породах достигающим 8, а в единичных случаях – 15–20 %. Для этих же пород характерно повышенное содержание сульфидной серы – 1,07 % в глинах и 0,8 % в песках, при отсутствии окисного железа. Общая мощность каждого ритма может достигать 55 м. По данным палинологических исследований, в споро-пыльцевом комплексе преобладает пыльца хвойных растений при подчиненной роли спор. Также довольно часто встречается пыльца гинговых (Папулов, 1965).

В строении отложений нижних аллювиальных ритмов наблюдается фациальная закономерность. В центральной части русла развиты стречневые аллювиальные отложения, которые к прибортовым частям фациально замещаются пролювиально-делювиальными. В породах широко проявлены эпигенетические изменения окислительного и восстановительного ряда, основная рудоформирующая роль принадлежит древнему эпигенетическому окислению. По данным детального минералого-геохимического картирования, в пределах позднеюрских долин эпохи инфильтрации кислородных вод несколько раз сменялись периодами элизионного внедрения вод, неоднократная смена окислительных условий на восстановительные подтверждается развитием минералов трехвалентного железа (гидроокислов) по минералам двухвалентного железа (сидерита и хлорита) и наоборот. Поступление глеевых вод происходило со стороны существовавшего на востоке артезианского бассейна, в периоды общего опускания территории и максимума морской трансгрессии. Урановое оруденение локализуется в основании аллювиальных ритмов и приурочено к выклиниванию зоны окисления. Контрастное богатое оруденение, как правило, приурочено к черноцветным породам, которые наиболее обогащены растительным органическим веществом и дисульфидами железа (пиритом). Выделено несколько структурно-морфологических типов пирита, в том числе его псевдоморфозы по растительной ткани. Пирит относится к постседиментационным минералам, образует конкреции, тонкие микроконкреции, псевдоморфно развивается по растительному органическому веществу. По сульфидизированным растительным остаткам развиваются гидроокислы железа, что свидетельствует о постседиментационном окислении пород.

Обугленное растительное органическое вещество в виде детрита отмечается во всех разновидностях сероцветных пород и в среднем составляет 4–6 %. По данным инфракрасной спектроскопии, оно относится к ранней стадии преобразования и по степени метаморфизма отвечает бурому углю.

Позднеюрский водоносный горизонт надежно изолирован от вышележащих горизонтов толщей красноцветных глин. Воды высоконапорные, с минерализацией 1,3–1,7 г/л, гидрокарбонатно-хлоридного состава.

Верхняя часть свиты представлена однообразной толщей первично-красноцветных глин общей мощностью до 200 м.

Выше залегают континентальные и морские мезозойско-кайнозойские отложения общей мощностью до 350 м. Меловые отложения коскольской свиты представлены красно-бурими, кирпично-красными и пестроцветными алевритистыми красноцветными глинами гидрослюдисто-каолинитового состава. Формирование отложений происходило в условиях жаркого аридного климата. Мощность толщи колеблется от 20 до 100 м, к востоку они фациально замещаются морскими отложениями.

Урановое оруденение приурочено к сероцветным породам с органическим веществом растительного происхождения. Рудные тела имеют протяженность от 400 м до 4 км, ширину 50–700 м и мощность от 2 до 12 м. Глубина залегания рудных тел 360–510 м, содержание урана колеблется от 0,01–0,06 (в среднем 0,04 %). Максимальные содержания урана в единичных пересечениях в штуфах достигают первых процентов, приурочены к прослоям, обогащенным растительными остатками. Рудные тела в плане имеют форму лент или пластообразных залежей, а поперечном сечении – ролловую форму. Рудные тела обычно тяготеют к зоне перехода грубообломочных пород в более глинистые, к участкам их переслаивания.

В результате многолетних детальных исследований руд Далматовского месторождения сотрудниками ИГЕМа и ВИМСа (Дойникова и др., 2009; Халезов, 2009, 2018) установлено, что дисперсная урановая минерализация имеет настуран-коффинитовый состав. Распределение урана в породах неравномерное, текстура пятнистая, вкрапленная, на радиографиях при преобладании вуалевидного распространения радиоактивности встречаются пятна и точки, характеризующие области с более высокими концентрациями урана. Урановые накопления также представлены сажистыми налетами урановой черни на полуразложившейся органике, присутствуют в сорбированной форме в каолините и на гидрослюдах железа. В рудах Далматовского месторождения встречаются микронные уран-титановые выделения, что не характерно для экзогенных месторождений (Дойникова и др., 2018). Рудные минералы являются минералами восстановленной формы урана.

Формирование оруденения было непрерывным. На фоне спокойного, постоянного процесса рудообразования отмечаются моменты активного поступления рудного вещества, обусловленные тектонической активизацией и инфильтрацией ураноносных вод. Последующие наложенные процессы приводили к перераспределению урана. Рассчитанное время рудогенеза составляет 100 млн лет (Халезов, 2009, 2018).

Сравнительный анализ условий образований гидрогенных урановых месторождений палеодолинного типа (Таблица 2.1) дал возможность, с одной стороны, обобщить ранее установленные факторы, необходимые для появления подобного типа месторождений, с другой – выделить ведущие и дополнительные критерии их выявления.

К ранее установленным факторам относятся, в первую очередь, принадлежность территорий, в пределах которых развиты ураноносные палеодолинные структуры, к складчатым областям, испытывавшим неоднократные циклы мезозойской тектоно-магматической активизации, с чем связано внедрение геохимически специализированных на уран пород фундамента (витимканский, амананский, орекитканский комплексы). Кроме того, к ним можно отнести формирование площадных кор выветривания в периоды тектонической стабильности,

что способствует переходу урана в подвижную форму и накоплению акцессорных минералов. Оба обозначенных фактора обеспечивают источник урана на рудоподготовительном этапе.

Таблица 2.1 – Основные характеристики геологического строения палеодолинных месторождений урана.

Типичные месторождения	Орогочи	Хиагдинское	Далматовское
Урановорудный район	Витимо-Каренгский	Витимский	Зауральский
Геотектоническое положение	Байкальская складчатая область	Байкальская складчатая область	Западно-Сибирская платформа
Ранг месторождения	мелкие	средние	средние
Радиогеохимически специализированные породы фундамента и содержания в них урана, %	Mz интрузивы с содержаниями урана от 5 до 15×10^{-4}	Pz витимканские граниты с содержаниями урана $6,5-6,7 \times 10^{-4}$	Pz и Mz сланцы и липариты с содержаниями урана $1-5 \times 10^{-3}$
Эпохи корообразования	К – Р	К – Р	Т–J
Рудовмещающие породы	Четвертичные торфяно-почвенные отложения пойм (Q)	Неогеновые делювиально-пролювиальные отложения (N _{1dj})	Юрские аллювиальные отложения (J _{2-3тв})
Климатические условия осадконакопления	Резко континентальный, гумидный	Мягкий, влажный с равномерным количеством осадков	Умеренно теплый и влажный, гумидный
Стадия формирования рудовмещающих пород	Седиментогенез	Диагенез–Эпигенез	Эпигенез
Стадия преобразования растительного детрита	Торфяная	Буроугольная	Буроугольная
Содержание C _{орг} , %	2,4–15	0,4–7	0,н–5
Урановые накопления и время начала их формирования	Сорбция урана на растительном детрите (5–7 тыс. лет)	Преимущественно поликомпонентные гели, отвечающие по составу нингиоиту (P–Ca–U) (от 20 млн лет и моложе)	Оксидная и силикатная минеральные формы (110–140 млн лет)



Ведущие факторы экзогенного рудообразования, установленные автором

Однако они не достаточны для создания урановых объектов в палеодолинных структурах. Для образования экзогенно-эпигенетических месторождений, согласно классической теории, считается необходимым существование аридного климата. В то же время заполнение

депрессивных структур (палеодолин) часто происходит в гумидных условиях, что обуславливает накопление большой массы растительного органического вещества и его последующее преобразование в углефицированные остатки, что в свою очередь приводит к появлению контрастного геохимического барьера. Изменение растительного детрита на различных стадиях осадко- и породообразования приводит к обогащению рудовмещающих пород различными биогенными компонентами, в том числе такими как фосфор, сера и различными органическими кислотами. Необходимо отметить, что растительный детрит в рудовмещающих породах Зауральского и Витимского регионов был различным, преимущественно хвойная растительность была распространена в юрское время, а в неогеновое на Витиме преобладала широколиственная.

Таким образом, наличие гумидного климата выступает дополнительным ведущим критерием формирования гидрогенных палеодолинных месторождений на начальной стадии накопления и изменения осадков. При этом нами установлено, что стадийные преобразования рудовмещающей толщи могут происходить как при гумидных (Витимский район), так и при аридных (Зауральский район) условиях, которые предопределяют особенности концентраций рудного вещества.

Другим дополнительным критерием, выявленным при сравнительном анализе, является обязательная последовательность трансформаций концентраций урана с момента накопления осадка, их диагенетических изменений и эпигенеза. Этот процесс непрерывен, хотя иногда ослабевает, и необходим для накопления промышленных концентраций урана. Так, при седиментогенезе образуются его сорбционные формы на поверхности растительного детрита. При дальнейших стадийных изменениях (диагенез и эпигенез) урановое вещество постепенно раскристаллизовывается, перераспределяется и концентрируется до промышленных скоплений. Необходимо отметить, что на ранних стадиях рудообразования, при концентрации сингенетических сорбционных накоплений формируются только малые поверхностные месторождения в торфяниках, которые в настоящее время не представляют практического интереса. Образование промышленных объектов возможно только при последовательном диагенезе и особенно эпигенезе.

Полученные результаты позволяют сформулировать *первое защищаемое положение*.

Ведущими факторами, влияющими на урановый рудогенез и масштаб объектов в базальных палеодолинах, являются однонаправленность и установленная непрерывная последовательность рудообразующего процесса, а также степень преобразования рудовмещающих пород, в том числе растительного органического вещества на различных стадиях литогенеза.

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ УРАНОВОРУДНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ НА СТАДИЯХ ЛИТОГЕНЕЗА И РОЛЬ РАСТИТЕЛЬНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

Согласно совместно разработанной усилиями геологов-производственников и специалистов научных организаций классической теории рудообразования экзогенно-эпигенетических месторождений урана, промышленные залежи металла локализуются на геохимических барьерах. В связи с кратковременностью пластово-инфильтрационного рудообразования в палеодолинных структурах, для его формирования необходимо наличие контрастных восстановителей, к которым относится и растительное органическое вещество.

Работами С.М. Манской (Манская, Дроздова, 1964), А. Салай (Салай, 1964), В.А. Успенского (Органическое ..., 1984; Успенский и др., 1985; Окислительные ..., 1990), З.А. Некрасовой (Некрасова, 1957), С.Д. Расуловой (Коченов, Расулова, 1978) и других исследователей установлено, что углистый растительный детрит и продукты его преобразования являются одним из важнейших восстановителей урана и имеют ведущее значение в создании геохимического барьера, способствуют накоплению металлов с переменной валентностью на месторождениях осадочного генезиса (Войткевич, 1983).

Рудовмещающими породами на песчаных месторождениях палеодолинного типа являются песчано-глинистые отложения, обогащенные значительным количеством углефицированного ОВ, накопление которого происходило в гумидных климатических условиях.

Органическое вещество на изучаемых месторождениях представлено остатками высших растений размерностью от первых мм до 10 см различной степени углефикации и имеет сингенетическую природу (Кисляков, Щеточкин, 2000). Также присутствует мельчайший рассеянный детрит, придающий отложениям сероцветную окраску и восстановительные свойства. На месторождениях Витимского и Зауральского регионов растительное ОВ преобразовано до буроугольной стадии, а на Каренгской площади – до торфяной (Эволюция ..., 2006). Его содержание коррелируется с повышенными концентрациями органического углерода в рудовмещающих сероцветных отложениях (%): в Зауральском регионе – до 5 (Халезов, 2009, 2017, 2018), в Витимском регионе – 3–7, на Каренгской площади до – 15. Аномальные (ураганные) содержания урана (1–2 %), как правило, приурочены к алевроито-глинистым прослоям, обогащенным растительным детритом, а также к лигнитам. Кроме того, в рудовмещающих отложениях Витимского и Зауральского регионов было выявлено присутствие гуминовых веществ (Успенский и др., 1985; Халезов, 2017), образование которых происходит при деструкции растительного детрита на стадии диагенеза.

Наличие разнообразного ОВ и продуктов его преобразований может быть объяснено полигенностью процессов, в первую очередь, осадкообразования, а затем и рудообразования (Холодов, 2020). Накопление и преобразование растительного вещества, выступающего основным восстановителем на песчаных месторождениях урана, подчинено общей схеме формирования осадочных пород, разработанной крупными отечественными литологами Н.М. Страховым (Страхов, 1960), Н.В. Логвиненко (Логвиненко, Орлова, 1987), О.В. Япаскурт (Япаскурт, 2008) и другими. Вследствие достаточно широкого распространения растительного ОВ в терригенных континентальных отложениях и почвах, оно является важнейшим фактором, влияющим на геохимические процессы литогенеза.

Процессы накопления и перемещения компонентов осадочных образований в поверхностных условиях с неограниченным доступом кислорода объединяют в стадию седиментогенеза (Япаскурт, 2008; Страхов, 1960). На последующей стадии (диагенез) при погружении осадка происходит его физико-химическое упорядочивание, в том числе разложение органического вещества в результате деятельности бактериального сообщества. На каждой последующей стадии литогенеза осадочные породы все более литифицируются. Для отработки месторождения методом СПВ рудовмещающие породы должны характеризоваться достаточно высокими скоростями фильтрации при хорошей проницаемости, что обеспечивается слабой цементацией песчано-гравийных разностей на соответствующей стадии диагенеза. Таким образом, на подобных объектах необходимо детальное изучение этапов седиментогенеза и диагенеза, а также наложенных эпигенетических процессов. Под эпигенетическими процессами в работе подразумеваются наложенные вторичные изменения с привнесом газо-жидких компонентов, нарушающих «правильную» стадийность порообразования (Экзогенные ..., 1965; Максимова, Шмариович, 1993; Кисляков, Щеточкин, 2000).

В рудной геологии стадии седиментогенеза и диагенеза, до проявления эпигенетических процессов, объединяют в стадию экзодиагенеза (Шмариович, 2007).

Изменение растительного органического вещества на ранних стадиях порообразования происходит при непосредственной активности микроорганизмов как в аэробных, так и в анаэробных условиях. Значительный вклад в изучение роли микроорганизмов в формировании геохимического барьера, а также в накоплении урановых руд осадочных месторождений урана внесли ученые ИГЕМа (Лисицын, 1965) и ВИМСа (Использование ..., 1990). В настоящее время О.А. Дойникова активно разрабатывает вопрос о связи типов урановой минерализации с различиями в микробиологическом сообществе (Дойникова, 2016; Дойникова, Петров, 2022). В частности, накопление фосфатной урановой минерализации (нингионита) на месторождениях Витимского урановорудного района, по результатам ее исследований, обусловлено широким распространением захороненного растительного органического вещества, из которого фосфор

высвобождался с помощью фосфобактерий при биосинтезе (Дойникова, 2016; Дойникова, Петров, 2022).

Месторождения урана в палеодолинных структурах характеризуются низкими–средними содержаниями урана 0,01–0,07 %. При этом в слабопроницаемых алевроито-глинистых разностях, обогащенных растительным органическим веществом, многократно наблюдалось наличие аномально высоких содержаний урана, в среднем 0,3 %, в единичных случаях до целых процентных содержаний.

На палеодолинных месторождениях урана России оруденение представлено:

- сорбционными накоплениями (Витимо-Каренгский район);
- преимущественно кальциевым фосфатом урана различной степени раскристаллизации, а также оксидами урана и акцессорной минерализацией (Витимский район);
- оксидом и силикатом урана (Зауральский район).

Процессы накопления и преобразования урана на различных стадиях породообразования, а также взаимосвязь преобразований растительного органического вещества и накоплений урана рассмотрены далее.

3.1. Накопление урана на стадии седиментогенеза (Витимо-Каренгский район)

На стадии *седиментогенеза* в поверхностных условиях преобразование растительного вещества начинается сразу после его отмирания. Захоронение растительности может осуществляться в почвах с доступом кислорода, а может в торфяниках или закрытых водоемах, практически без доступа свободного кислорода. Независимо от места захоронения, растительный остаток подвергается активной бактериальной переработке. В условиях доступа кислорода в почве при разрушении растительного остатка формируются почвенные гуминовые кислоты, которые способствуют выщелачиванию химических элементов из подстилающих отложений, формированию новых органоминеральных устойчивых соединений, миграции в конечные водоемы стока.

При захоронении растительности в торфяниках их преобразование происходит в восстановительных условиях на месте отложения, более медленно по сравнению с кислородными обстановками. За счет процессов разложения (гумификации) растительности и формирования органических кислот грунтовые воды болот и торфяников характеризуются кислой, либо слабонейтральной геохимической обстановкой.

Подобные геохимические обстановки фиксируются в Витимо-Каренгском районе. Рудовмещающие отложения рыхлые, буровато-коричневые, темно-бурые (вплоть до черного цвета), сложенные слабо разложившейся растительностью с включениями дресвы и щебня кварц-полевошпатового состава. Среди растительных остатков достоверно различаются тонкие корни,

стебли, ветки кустарников, остатки травы и мха с неизменной клеточной структурой (Рисунок 3.1). Темно-коричневая окраска отложений обусловлена формированием гумусовых веществ в результате разложения растительности в условиях застойных вод. Так как отложения расположены в зоне аэрации и обводнены, преобразование растительных остатков находится на начальной стадии – торфообразования (Войткевич, 1983). Современные воды являются нейтральными или слабощелочными (рН 5,9–7,9) (Поверхностные ..., 2015; Миронов и др., 2015), а окислительно-восстановительный потенциал колеблется от 19 до 322 мВ. Известно, что восстановительными условиями для урана являются $Eh < 200$ мВ и $pH > 6$ (Гаррелс, Крайст, 1968), что и фиксируется на большей части территории Витимо-Каренгского района. Накопление урана в восстановительной обстановке обеспечивается активной ролью анаэробных бактерий с участием органического вещества как источника энергии. Современные отложения с рудными концентрациями урана расположены непосредственно на гранитах фундамента, геохимически специализированных на уран. Рудные концентрации урана приурочены к торфяно-почвенным отложениям, представленным слаборазложившейся органикой с переменной примесью терригенного материала, преимущественно дресвы и щебня гранитного состава (Рисунок 3.1). Минеральный состав терригенной примеси торфа отражает состав материнских гранитов. Концентрации урана варьируют от 0,2 до 1,1 % и коррелируют с содержанием органического вещества.

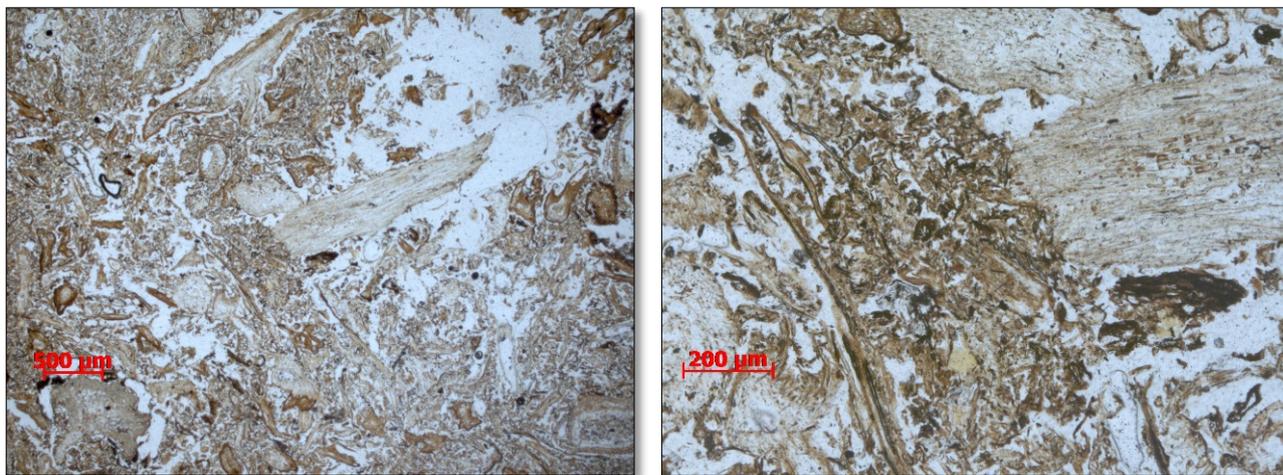


Рисунок 3.1 Неизменный растительный детрит в образце с содержанием U – 1,94 %. Каренгская площадь. Фото шлифов, николи параллельны.

На радиографиях к руде наблюдается вуалевидное распределение треков радиоактивности, которое местами незначительно сгущается над растительными остатками. В целом торфяно-почвенные образования тонко пропитаны ураном. В отдельных случаях установлено точечное распределение треков радиоактивности, которые обусловлены наличием акцессорных минералов, таких как монацит, циркон, сфен и др. В поверхностных условиях в пределах торфяников низинного типа накопление урана в ассоциации с растительным

органическим веществом происходит в ионно-сорбционной форме (Положительные ..., 2019). Учитывая вуалевидное распределение треков радиоактивности, можно предположить наличие сорбционных накоплений и в отложениях Витимо-Каренгского района.

Повышенные содержания урана (до целых %) приурочены к растительному детриту. Необходимо отметить, что повышенные содержания урана (5–6 %) тяготеют к краевым частям детрита, а к центральной части постепенно уменьшаются до нуля (Рисунок 3.2, Таблица 3.1).

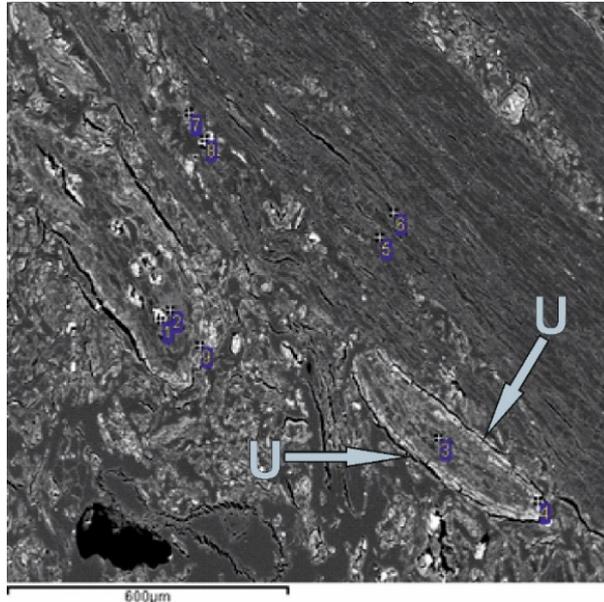


Рисунок 3.2 Растительный детрит с концентрациями урана по периферии. Орогочинское месторождение, Витимо-Каренгский район. I стадия рудообразования. Изображение в обратно-рассеянных электронах, РСМА

Таблица 3.1 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 3.2.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)						
	Al	Si	P	S	Ca	Fe	U
3	0,14	0,05	-	-	1,23	0,13	0,43
4	0,85	0,13	-	0,2	5,36	0,45	1,67

Для пород, находящихся на стадии седиментогенеза (*стадия I*), урановые накопления присутствуют как в мономинеральных образованиях, так и в виде поликомпонентных обособлений. Уран концентрируется в шаровидных образованиях размером 200–500 микрон, сложенных углистым веществом и слоистыми алюмосиликатами, в которых его содержание достигает 3,91 %. Также он диагностирован в каплевидных гелеподобных выделениях с содержаниями 4,35 %. В то же время уран выявлен в скорлуповатых образованиях размерностью в 5 мкм, сложенных органическим веществом. Значительно более высокие содержания урана до 15 % обнаруживаются в акцессорных минералах, в том числе монацитах. Таким образом, несмотря на то, что урановые концентрации достигают целых процентов, значительная его часть присутствует в виде ионно-сорбционной пропитки и находится в безминеральной форме.

Наиболее активно процесс сорбции урана происходит в обводненных условиях, в среде, обедненной кислородом, при pH 4–6,5, что характерно для Каренгской площади.

Таким образом, учитывая характер распределения урановых концентраций и отсутствие минеральных форм, можно сделать вывод о том, что на стадии седиментогенеза рудные концентрации урана представлены сорбционными накоплениями в краевой части растительных остатков.

3.2. Последовательность накоплений урана на ранних стадиях диагенеза (Витимский район)

Взаимосвязь урановых накоплений и углефицированного растительного вещества на даигенетической стадии породообразования изучена на месторождениях Витимского урановорудного района. Урановая минерализация на месторождениях района преимущественно представлена различной степенью кристаллизации – от аморфных до минеральных форм кальциевого фосфата урана (Особенности ..., 2014; Тарханова, Прохоров, 2017; Сащенко и др., 2022; Дойникова и др., 2009; Дойникова, 2012; Дойникова и др., 2018; Дойникова, Петров, 2022). Оксидная урановая минерализация встречается достаточно редко (Дойникова, 2012; Винокуров и др., 2017; Тарханова, Прохоров, 2017).

Для стадии *диагенеза* характерно постепенное погружение осадков, сформированных на сингенетической стадии, в процессе которого происходят биологические и физико-химические реакции в неравновесной обводненной системе, насыщенной микроорганизмами, получающими питание при разложении растительных остатков (Страхов, 1960; Япаскурт, 2008). По мере развития процессов диагенеза прекращается доступ свободного кислорода, но переход к нему происходит постепенно, в начале процессов еще отмечается достаточное количество кислорода, и только потом аэробные бактерии сменяются анаэробными. При окислении органического вещества выделяются простые минеральные компоненты (CO_2 , H_2O и др.), которые в последующем используются для питания анаэробными бактериями. Наибольшим развитием в восстановительных условиях диагенеза пользуются сульфатредуцирующие бактерии (Войткевич, 1983; Страхов, 1960).

В зависимости от различных типов ОВ, процессов его преобразований и условий захоронения осадка, может формироваться сульфидная либо углекислая геохимическая зона диагенеза, что приводит к выпадению в осадок сульфидов либо карбонатов (Холодов, 2020). Также в условиях свободного доступа кислорода может формироваться кислородная зона, которая характерна для поверхностных условий начального диагенеза. Формирование сульфидной либо углекислой зоны зависит от наличия свободной углекислоты (CO_2), которая формируется в основном при окислении органики. При недостатке углекислоты в анаэробных условиях создаются благоприятные условия для деятельности сульфатредуцирующих бактерий,

в результате чего формируется сульфидная геохимическая зона, в условиях которой не осаждаются карбонаты из-за их повышенной растворимости. На месторождениях урана палеодолинного типа диагенез осадков происходит в условиях сульфидной геохимической обстановки, а карбонаты, в том числе карбонаты железа на стадии диагенеза не формируются. Так как последовательность преобразований в подобных геохимических условиях диагенеза зависит от масштабов деятельности сульфатредуцирующих бактерий, то логично рассмотреть стадийность происходящих процессов с точки зрения образования дисульфидов железа.

Преобразование растительного органического вещества на стадиях как седиментогенеза, так и начального диагенеза происходит в обводненных условиях, что и приводит к гумификации органического вещества и его неполному разложению. Учитывая, что погружение отдельных частей бассейна, особенно в Витимском урановорудном районе, происходит неравномерно, в рудовмещающих отложениях можно зафиксировать различные этапы преобразования растительного вещества, от практически неизмененных (сохранившихся со стадии седиментогенеза) до полностью замещенных глинистыми или рудными минералами, а также псевдоморфным пиритом.

На начальной стадии диагенеза (*стадия II*), когда прекращается доступ кислорода, еще не образуются сульфиды железа, в пределах растительных остатков сульфатредуцирующие бактерии только начинают свою деятельность, в результате чего продуцируется сера биогенной природы, ее содержание составляет 1,2–1,4 % (Рисунок 3.3, Таблица 3.2). На поверхности растительного детрита формируются колломорфные рудные образования, имеющие сорбционную природу (Рисунок 3.4). В отличие от накоплений урана на стадии седиментогенеза только в краевых частях растительных остатков, на стадии раннего диагенеза он распространен по всей поверхности равномерно. Концентрации урана достигают 1,4 %. При этом на данной стадии практически не происходит обогащение растительного остатка элементами-спутниками урана, характерными для урановой минерализации Витимского УРР (%): Р – 0,1, Са – 0,02, Al – 0,3 и Si – 0,2.

Данные о том, что накопление концентраций урана на месторождениях Витимского района могло начаться до формирования покровов базальтов, получены сотрудниками ИГЕМ при изучении изотопных соотношений на месторождении Дыбын (U-Pb системы ..., 2013). По данным исследований В.Н. Голубева (2013), время начало формирования урановой минерализации соответствует 12–12,5 млн лет, т.е. времени накопления нижнеджилдинской свиты. Продолжительность рудоформирующего процесса, по данным этих же исследователей, составила порядка 6,5 млн лет.

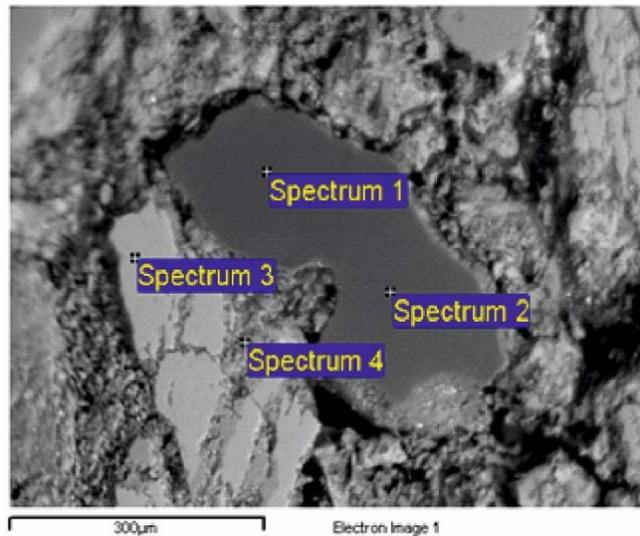


Рисунок 3.3 Углистый обломок в рудовмещающих песках с повышенным содержанием серы и железа, а также с сорбированным ураном. II стадия рудообразования. Месторождение Источное, Витимский урановорудный район. Изображение в обратно-рассеянных электронах, РСМА

Таблица 3.2 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 3.3.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)						
	Al	Si	P	S	Ca	Fe	U
1	0,27	0,19	0,06	3,12	0,02	2,62	1,24
2	0,16	0,13	0,11	3,24	0,02	2,86	1,37

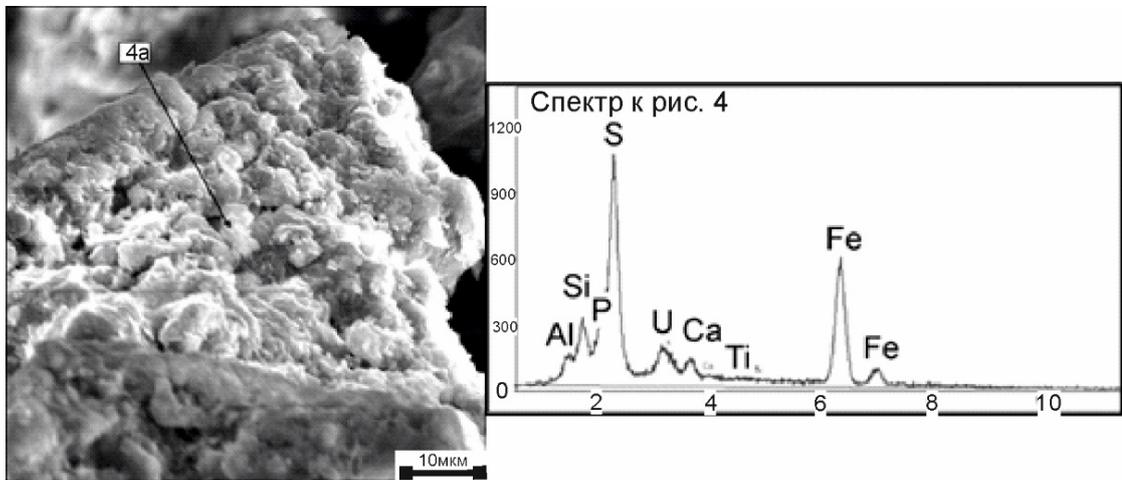


Рисунок 3.4 Углистый обломок в рудовмещающих песках с повышенным содержанием серы и железа, а также с сорбированным ураном. II стадия рудообразования. Месторождение Источное, Витимский урановорудный район. Изображение в обратно-рассеянных электронах, РСМА

На последующей *стадии* диагенеза (*III*) начинают формироваться дисульфиды железа, сначала в единичных клетках растительности, постепенно заполняя все свободные клетки (Рисунок 3.5 Рисунок 3.6). В результате содержания серы и железа повышаются до 14,5 и 14,07 %, тогда как на предыдущей стадии их количество было менее 3 %. Так как геохимические условия практически аналогичны зоне седиментогенеза, непосредственно растительная ткань

практически не изменена (Рисунок 3.6, Таблица 3.3). В ее пределах содержание серы и железа не превышает 4 % (спектры 4 и 6). Обогащение урана происходит только сорбционным путем (рис. 3.6). Подобные процессы его сорбционного накопления в пределах растительного детрита схожи с описываемым механизмом на стадии седиментогенеза в пределах Витимо-Каренгского района.

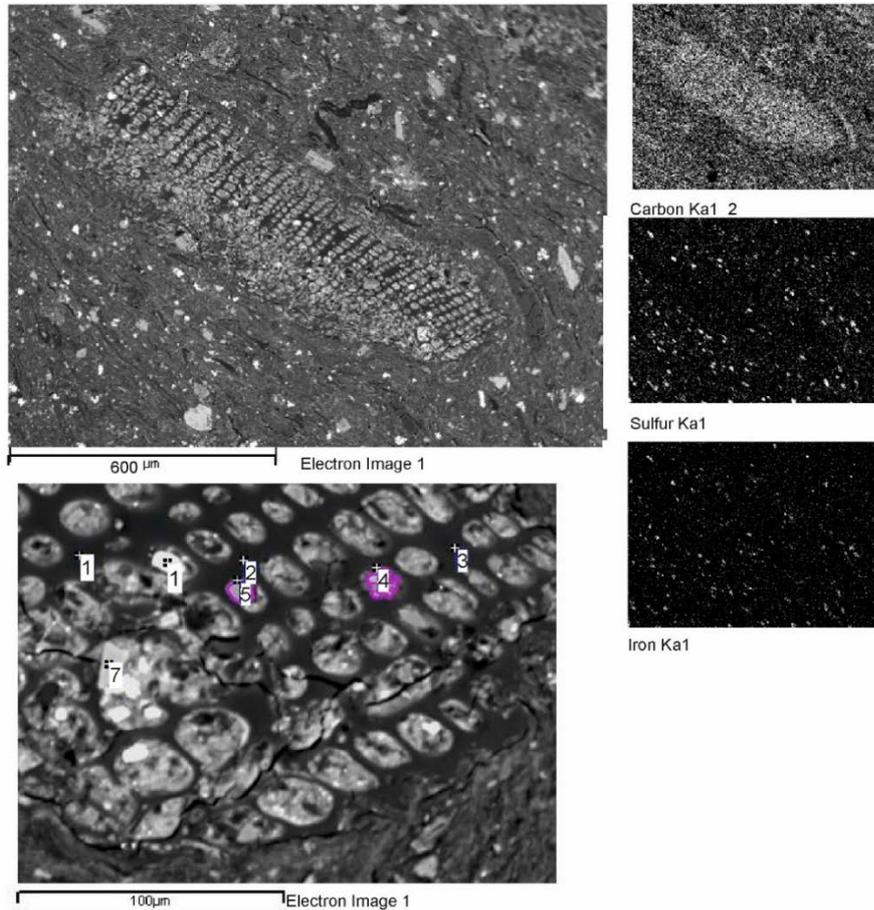


Рисунок 3.5 Углефицированный растительный обломок с клеточной структурой, с единичным развитием сульфидов железа. III стадия рудообразования. Слева – изображение в обратно-рассеянных электронах; справа – в характеристическом рентгеновском излучении РСМА. Участок Дулесма, Витимский урановорудный район

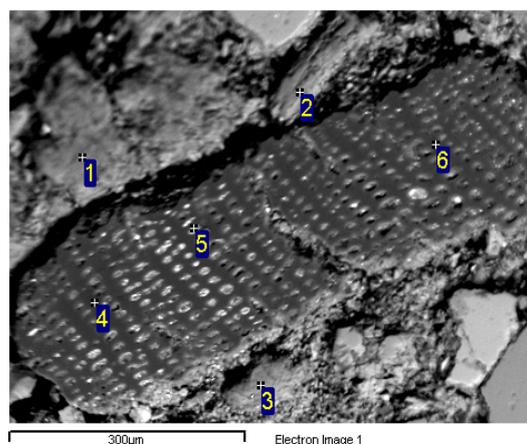


Рисунок 3.6 Обломок углефицированного растительного детрита в рудовмещающих песках. В клеточной структуре формируются сульфиды железа (спектр 5, белое) с сорбированным ураном (спектр 4, 6). III стадия рудообразования. Месторождение Источное, Витимский урановорудный район. Изображение в обратно-рассеянных электронах, РСМА

Таблица 3.3 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 3.6.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)						
	Al	Si	P	S	Ca	Fe	U
4	0,11	0,1	0,06	4,36	-	2,87	1,64
5	1,16	1,33	0,08	14,55	0,14	14,07	0,91
6	0,09	0,12	0,07	4,48	0,04	3,04	1,93

На последующей *стадии (IV)*, благодаря все продолжающейся и усиливающейся деятельности сульфатредуцирующих бактерий, фрамбоидальный пирит псевдоморфно развивается по всему растительному остатку, в том числе и по растительной ткани, а не только в клеточной структуре (Рисунок 3.7, Таблица 3.4). В цементе начинают формироваться дисульфиды железа мельчайшего размера. По мере развития жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий, фрамбонды пирита псевдоморфно замещают растительные остатки, одновременно восстанавливая уран. Так, в рудоносных алевритах месторождения Количикан в растительном детрите концентрации элементов достигают (%): U – 10, P – 2,28, Ca – 1,9, Al – 4,51, Si – 5,47, S – 6,35 и Fe – 4,83 (Рисунок 3.7, Таблица 3.4). По сравнению с сорбционными накоплениями раннедиагенетических стадий (*II* и *III*), содержания урана, приуроченные к фрамбондам пирита, увеличиваются – с 1,4 до 10 %.

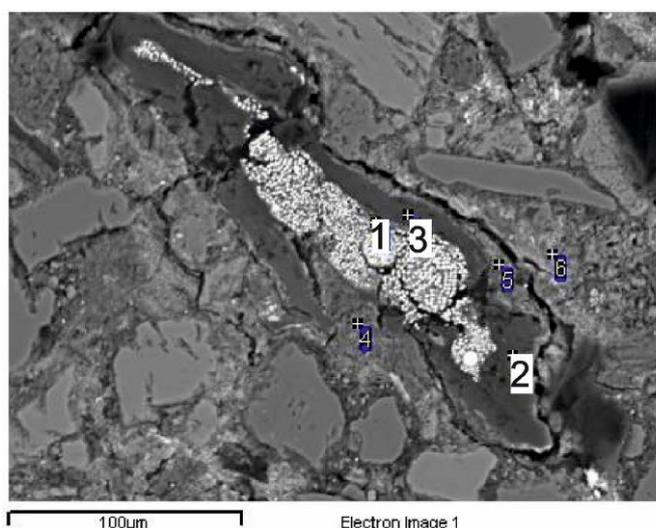


Рисунок 3.7 Фрамбоидальный пирит, псевдоморфно развивающиеся по растительному остатку с повышенными содержаниями урана. *IV* стадия рудообразования. Месторождение Количикан. Изображение в обратно-рассеянных электронах, РСМА

Таблица 3.4 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 3.7.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)						
	Al	Si	P	S	Ca	Fe	U
1	4,51	5,47	2,28	6,35	1,90	4,83	10,52
2	0,64	0,8	0,03	5,58	0,9	0,4	3,39
3	0,16	0,33	0,09	5,60	0,8	0,78	2,56

К следующему этапу диагенеза (стадия V) дисульфиды железа успевают сформировать скопления фрамбоидов и полностью псевдоморфно заместить растительный остаток. В это же время они восстанавливают достаточное количество урана. В большинстве фрамбоидов пирита содержатся высокие концентрации урана, кальция и фосфора, а вокруг них концентрируются выделения нингионита с повышенными содержаниями железа и серы (Рисунок 3.8, Таблица 3.5).

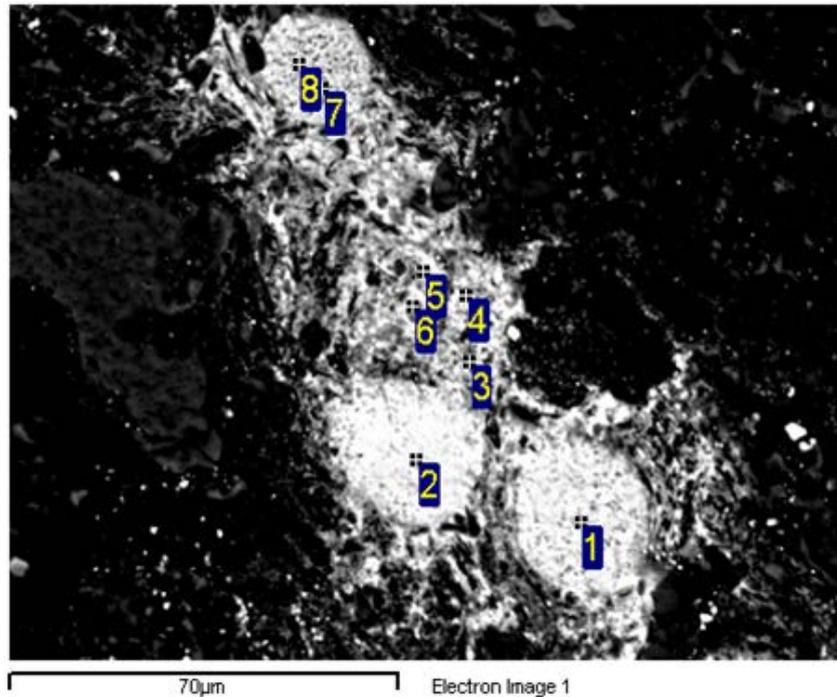


Рисунок 3.8 Пространственная ассоциация фрамбоидальных пиритов и выделений нингионита. V стадия рудообразования. Месторождение Дыбырын. Изображение в обратно-рассеянных электронах, РСМА

Таблица 3.5 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 3.8.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)						
	Al	Si	P	S	Ca	Fe	U
1	0,25		3,44	33,96	4,18	29,47	12,26
2	0,39	0,48	3,79	31,3	4,7	27,01	13,46
3	4,98	6,65	4,3	11,42	5	12,99	15,75
4	5,09	8,78	5,15	7,63	6,58	7,86	17,41
5	5,95	8,9	5,42	6,15	6,62	5,68	20,41
6	6,85	8,99	6,09	1,27	7,03	1,29	21,32
7	0,6	0,54	-	50,23	-	43,79	-
8	0,25	0,21	-	49,79	0,22	43,8	-

Нингионит является кальциевым фосфатом урана, в котором соотношение P:Ca:U= 2: (0,6-0,9): (1,04-1,1) (Дойникова, 2012). На месторождениях Витимского района присутствуют поликомпонентные урановые гели с различным соотношением элементов, от полностью аморфных до минералогических форм нингионита, что позволяет проследить постепенную эволюцию поликомпонентных гелей. На Рисунок 3.9А видно, что основная масса

урансодержащего вещества с содержаниями (%) U – 12,3–14,4; P – 1,9–6,1 и Ca – 2,6–3,5 как бы пропитывает глинистую массу (Таблица 3.6). При большем увеличении видно, как по периферии однородной алюмосиликатной массы с высокими содержаниями элементов появляются обособления с еще более высокими их концентрациями (%): U (22,9), P (10,04) Ca (6,2) (Рисунок 3.9Б, Таблица 3.6). По составу они уже соответствуют кальциевому фосфату урана – нингиоиту. Таким образом, нами выявлен процесс раскристаллизации однородной гелеподобной массы с последовательным формированием самостоятельных минеральных фаз.

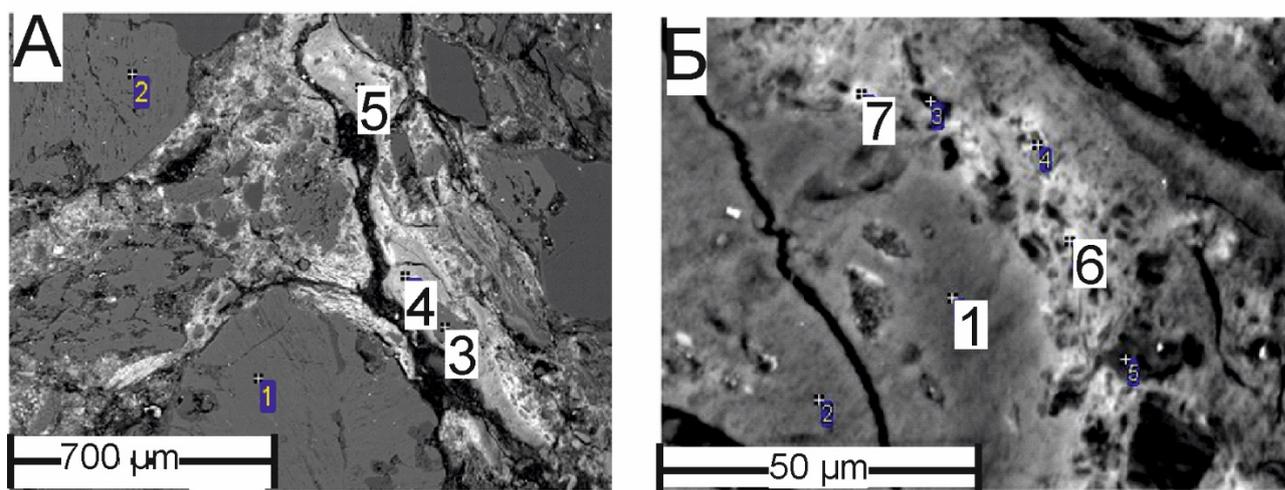


Рисунок 3.9 Ураносное P-Ca-содержащее вещество в глинистом цементе песчаника (белое). А – общий вид, Б – увеличенная часть с обособлениями кальциевого фосфата урана по периферии цемента. Месторождение Хиагда. Изображение в обратно-рассеянных электронах, РСМА

Таблица 3.6 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 3.9.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)								
	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe	U	O
	А. Общий вид								
3	9,07	28,45	0,03	0,08	13,3	0,02	0,21	-	43,55
4	7,09	10,01	6,07	1,37	0,2	3,25	4,25	14,4	32,49
5	8,16	12,07	4,92	1,40	0,07	2,56	4,08	12,27	33,77
	Б. Участок детализации								
1	8,43	12,06	4,88	1,25	0,16	2,64	3,85	12,57	33,9
6	4,93	5,94	8,85	2,26	0,06	5,57	4,44	22,5	33,08
7	2,35	3,47	10,04	2,54	0,35	6,21	5,77	22,93	30,88

Параллельно с развитием процессов диагенеза и деятельностью сульфатредуцирующих бактерий в проницаемые отложения поступают кислородные инфильтрационные урансодержащие воды. В алевролитистых породах, для которых характерен более длительный контакт растительного детрита с этими водами, диагностирован углефицированный растительный детрит, в котором методом РСМА установлены две области с различным содержанием урана и его соотношением с сопутствующими элементами (Рисунок 3.10, Таблица

3.7). Непосредственно органический остаток характеризуется незначительными концентрациями урана (0,19 %), скорее всего, сорбционной природы и относительно повышенными серы (2,28 %). Поля распространения этих элементов полностью совпадают с областью распределения железа и углерода (Рисунок 3.10А, Таблица 3.7). Такое соотношение S, Fe и C соответствует начальной стадии диагенетических преобразований осадка и жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий. В пределах растительного остатка нами установлен процесс сорбции урана, который отвечает ранней стадии диагенеза, описанной выше.

Область же высоких содержаний урана (9,7 %) совпадает с полями распространения повышенных содержаний (%) фосфора (3,8), кальция (3,4), алюминия (11) и кремния (14,3) (Рисунок 3.10Б, Таблица 3.7). Таким образом, растительный остаток замещается поликомпонентными гелями с элементами нингиоитового состава, без формирования минеральных форм. Полностью совпадающие поля распространения урана, фосфора, кальция, алюминия и кремния свидетельствуют о том, что данные элементы поступали совместно, в одном инфильтрационном потоке, на более поздних стадиях рудогенеза, возможно, на стадии «наложенного эпигенеза».

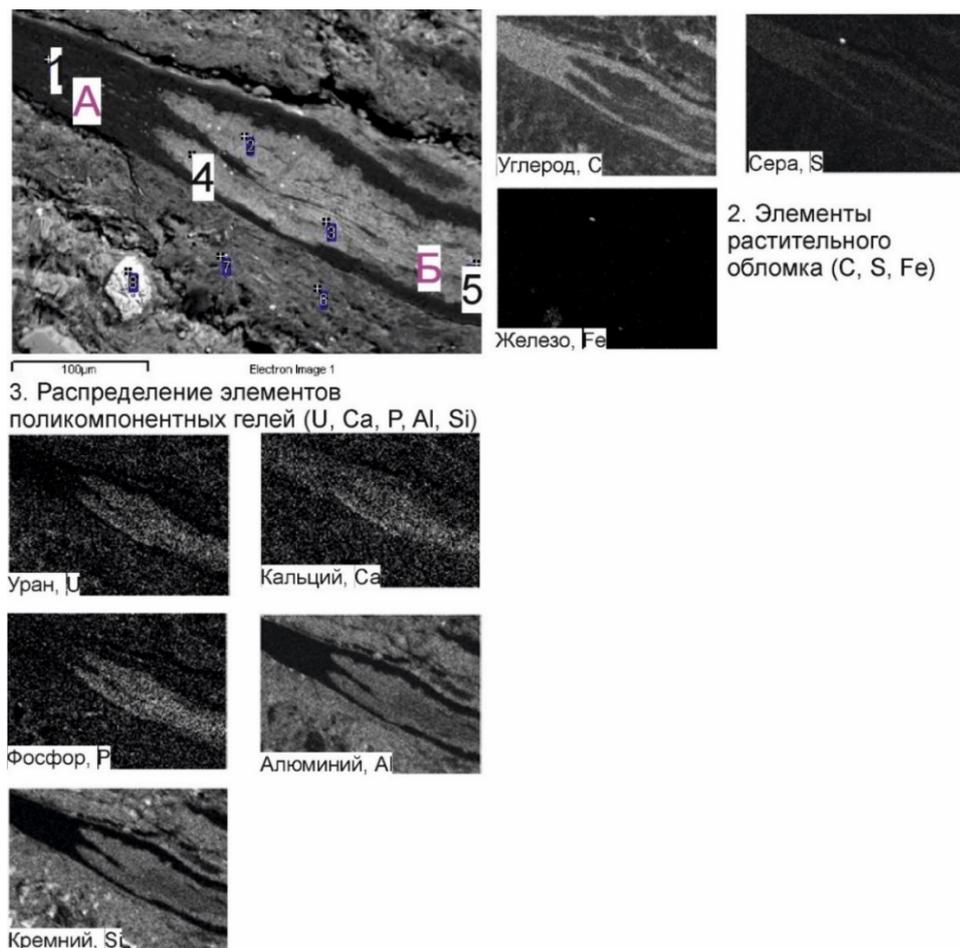


Рисунок 3.10 Замещение растительного обломка (А) поликомпонентным гелем (Б) (U-Ca-P). 1 – изображение в обратно-рассеянных электронах; 2 – поля распределения элементов в растительном детрите (углерод, сера и железо); 3 – поля распределения элементов поликомпонентных гелей нингиоитового состава (U, Ca, P, Al, Si). Поля распределения элементов в характеристическом рентгеновском излучении. РСМА

Таблица 3.7 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 3.10.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)						
	Al	Si	P	S	Ca	Fe	U
1	0,26	0,13	-	2,28	1,85	0,25	0,19
2	11,04	14,35	2,01	0,4	2,07	1,59	4,99
3	7,67	9,78	3,83	0,78	3,39	1,46	8,95
4	9,01	11,35	2,45	1,57	2,76	1,51	6,88
5	5,97	7,37	3,42	0,96	3,24	1,03	9,27

При анализе минерального состава рудовмещающих пород на месторождениях Витимского района установлено, что содержание сульфидов железа не превышает 0,5 %. Пресные воды континентальных отложений, развитые в Витимском регионе, имеют минерализацию, не превышающую 1,6 г/л, и содержат в ничтожно малом количестве сульфат-ион. Сульфатредукция в Витимском регионе происходит только за счет минерализации органических соединений, т.е. распада органического вещества (Логвиненко, Орлова, 1987; Япаскерт, 2008). При детальном изучении месторождений не диагностированы кристаллические формы пирита, которые характерны только для более поздних этапов диагенеза.

Таким образом, детальные минералогические исследования урановой минерализации на месторождениях Витимского района позволяют сделать следующие выводы:

1. Содержание урана в пределах растительных остатков постепенно увеличивается от 1 % на начальной стадии диагенеза, что соответствует сорбционным накоплениям, до 20 % на заключительных стадиях.
2. Урановая минерализация раскристаллизовывается до минеральных форм – нингиоита.
3. Эпигенетические накопления урана представлены поликомпонентными гелями нингиоитового состава, в том числе замещающими растительный остаток.

3.3. Накопление урана на поздней стадии диагенеза и эпигенеза (Зауральский район)

Урановая минерализация на месторождениях Зауральского региона сформировалась в результате длительного процесса, сопровождающегося неоднократной сменой окислительных и восстановительных геохимических условий (Халезов, 2009, 2017). Уран в рудах находится в собственно минеральной форме, преимущественно в виде оксидов, в меньшей степени в силикатной форме. На Далматовском месторождении урана также выявлены уран-титановые образования, в том числе, обогащение лейкоксенизированного ильменита (Дойникова и др., 2009; Халезов, 2017, 2018).

В рудовмещающих породах наблюдается тесная пространственная связь сульфидов железа и минералов урана, а также большое разнообразие форм пирита и превращение одной морфологической формы в другую в одном образце, что предполагает неоднократное осаждение урана (Рисунок 3.11). Наиболее мелкие обособления сульфидов железа представлены фрамбоидами, которые развиваются по продуктам жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий, в том числе в пределах растительных остатков. Чуть более крупные выделения в цементе начинают приобретать кристаллическую морфологию. Агрегаты кристаллов формируют крупные стяжения и конкреции.

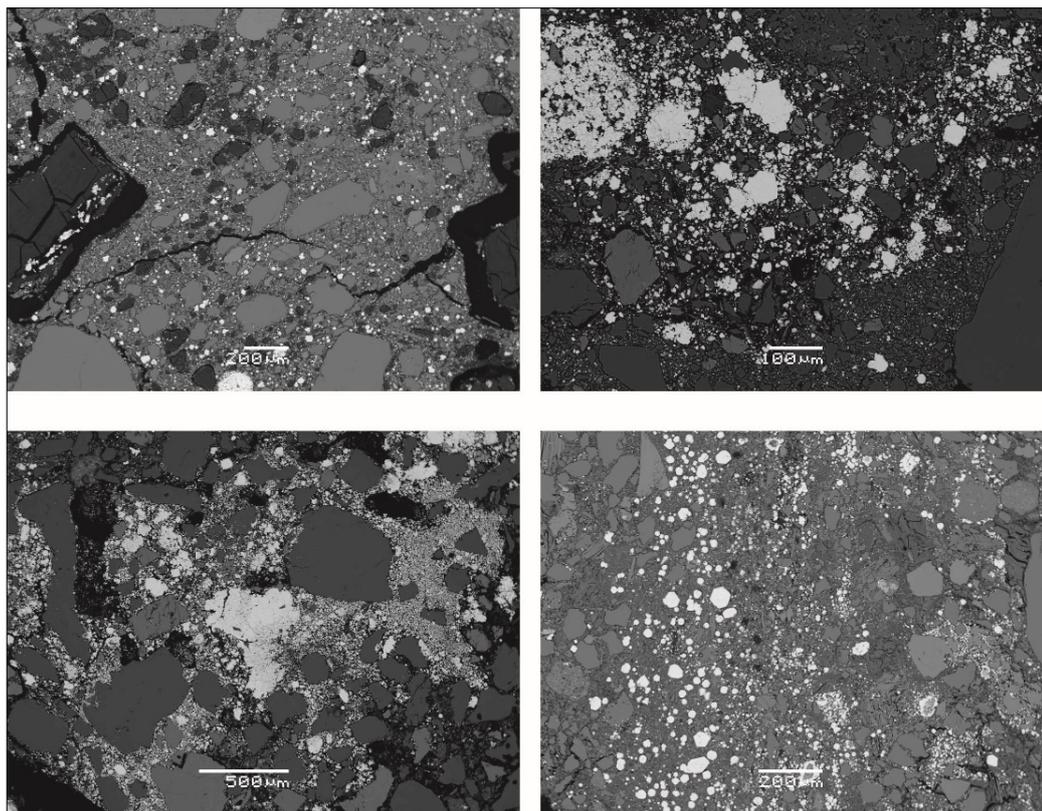


Рисунок 3.11 Разнообразие морфологических форм пирита (белое) в рудном образце. Зауральский район. Изображение в обратно-рассеянных электронах, РСМА

Руды на месторождениях Зауральского района, в том числе на Добровольном месторождении, имеют вкрапленную и вуалевую текстуры (Рисунок 3.12), на радиографиях хорошо видна приуроченность радиоактивности к глинистому цементу. Урановая минерализация месторождений представлена оксидом урана (настураном) различной морфологии с существенно подчиненным количеством коффинита (Халезов, 2009). На объекте выделяются богатые руды с содержанием урана от 0,1 % и выше, рядовые руды с концентрациями от 0,04 до 0,099 %, и бедные руды, содержащие от 0,01 до 0,039 %. Автором при детальном исследовании руд Добровольного месторождения по характеру выделений, морфологии и взаимоотношениям с другими минералами выделены три разновидности оксида урана (Самоочищение ..., 2022).

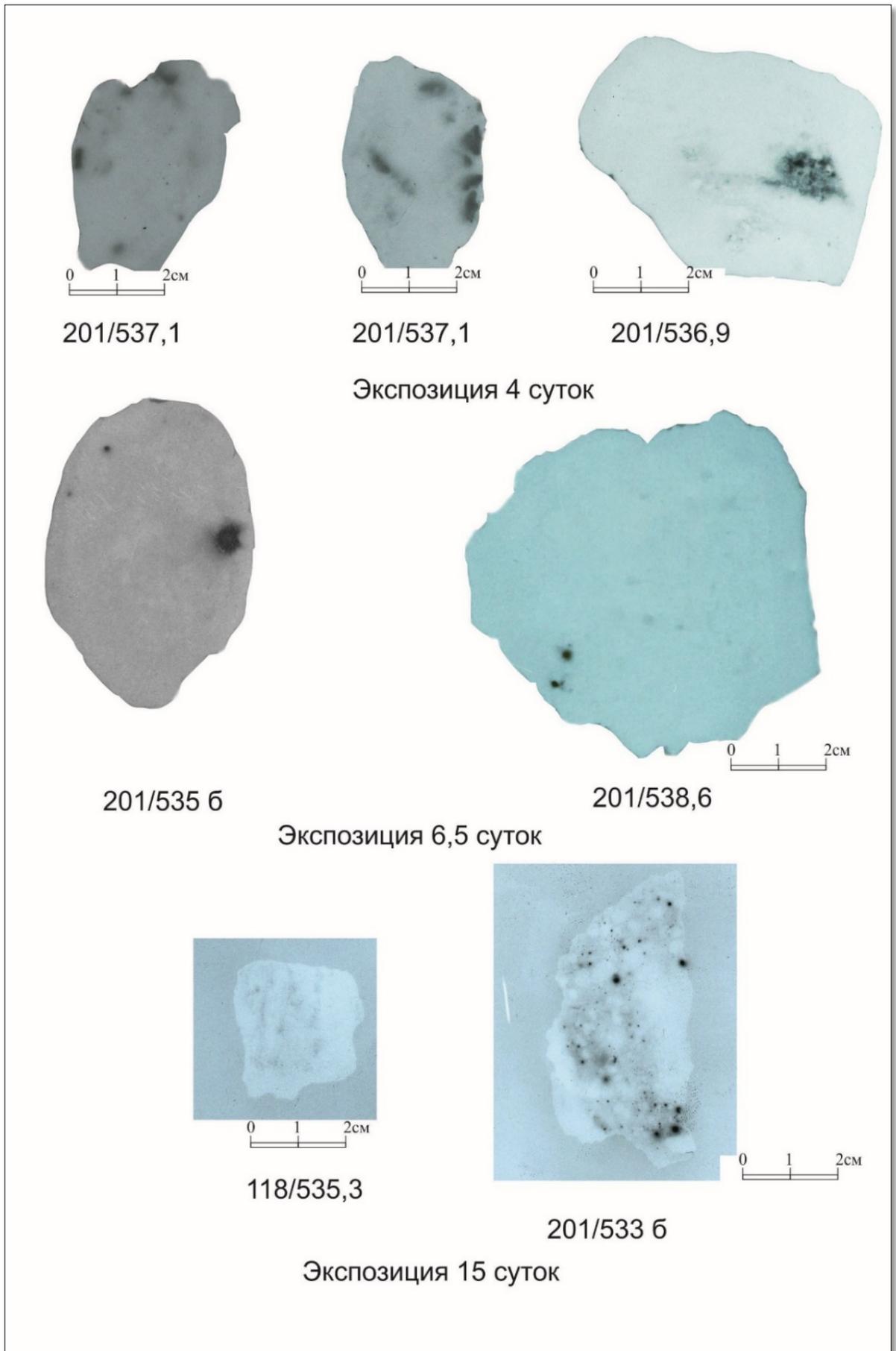


Рисунок 3.12 Текстуры руд на Добровольном месторождении: пятнистая, вкрапленная и вуалевидная. Радиографии к полированным штуфам

Первая разновидность оксида урана представлена плотными выделениями среди терригенных зерен и пирита, развивающегося в цементе песчаника (Рисунок 3.13, Таблица 3.8). Для нее характерны трещины усыхания и высокая отражательная способность. В минерале постоянно определяются Si, P, S, Cl, Ca, Ti, V и (не повсеместно) Fe и Mn. Присутствие кремния позволяет допускать примесь коффинита в изученных обособлениях.

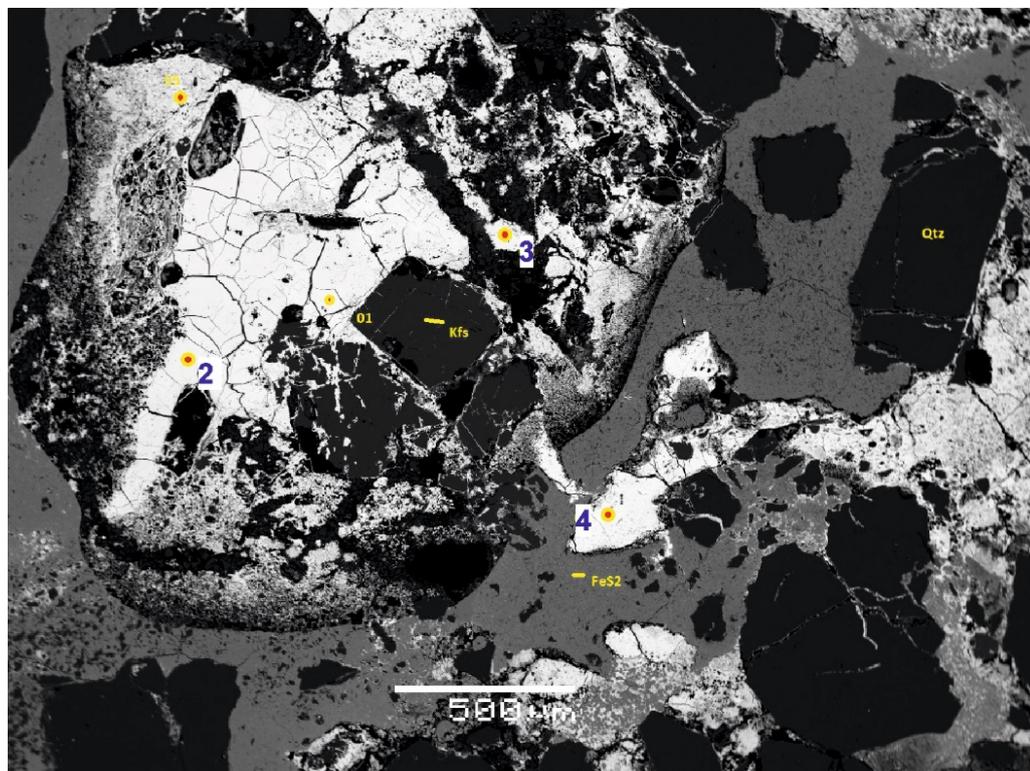


Рисунок 3.13 Урановая минерализация первого типа, представленная плотными выделениями оксида урана (белое). VII стадия рудообразования. Месторождение Добровольное, Зауральский район. Изображение в обратно-рассеянных электронах, РСМА

Таблица 3.8 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 3.13.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)											
	O	Si	P	S	Cl	Ca	Ti	V	Fe	Mn	U	Сумма
2	21,91	0,5	0,89	0,36	0,06	2,97	0,48	0,3	–	0,29	68,67	96,63
3	21,31	0,51	0,83	0,17	0,21	2,79	0,41	0,22	–	0,19	69,73	96,54
4	21,12	0,62	0,86	0,63	0,31	1,07	0,5	0,3	0,4	–	71,85	97,64

Вторая разновидность оксида урана встречается наиболее часто и распространена наиболее широко. Как правило, это близкие к округлым обособления с наблюдаемым иногда радиально-лучистым строением (Рисунок 3.14, Таблица 3.9). Выявленное совместное нахождение двух разновидностей оксида урана, предположительно, свидетельствует о одновременности их образования. Размеры вкраплений данной разновидности микронные, редко выявляются более крупные, в которых возможно определение состава минерала. Оксид урана второй разновидности формирует вкрапленность в цементе песчаника по краям

обломочных зерен, кристаллов и зерен пирита, редко по трещинам проникает в зерна кварца и пирита. Определение химического состава двух разновидностей минерала показывает их различие в соотношении элементов-примесей. Вторая разновидность несколько более «чистая» от них, чем первая. Исключение составляет наличие значительного количества серы, вероятно, биогенной природы.

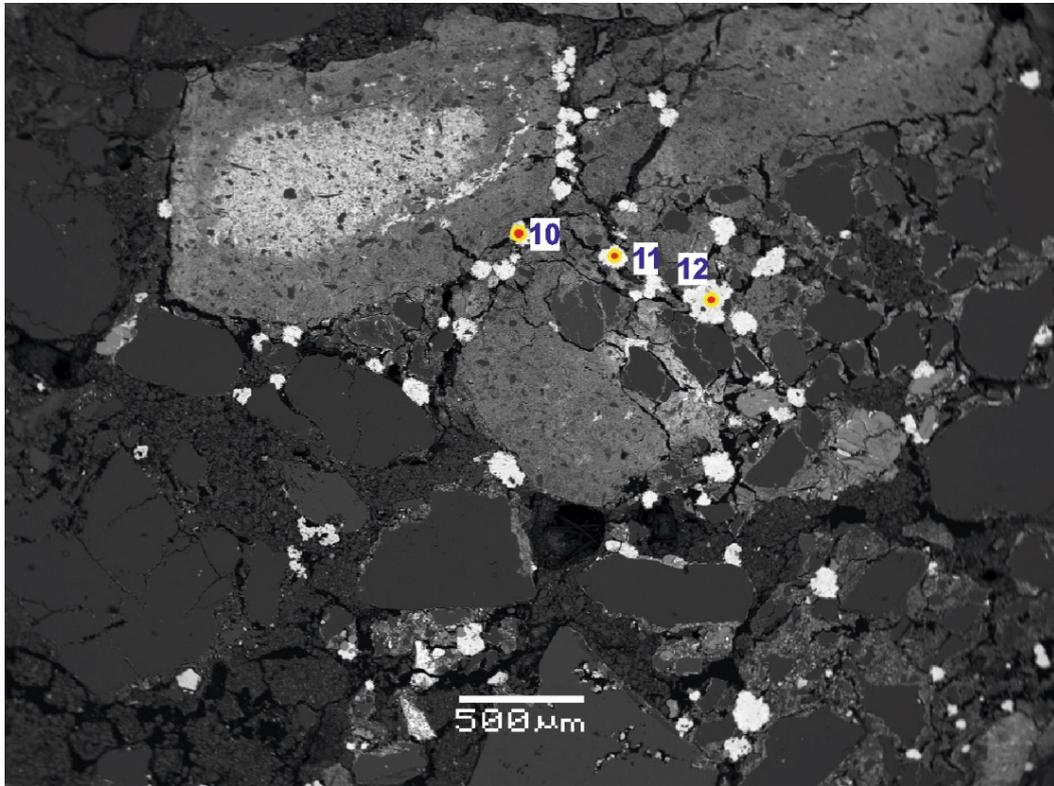


Рисунок 3.14 Урановая минерализация второго типа, представленная округлыми обособлениями оксида урана (белое). VII стадия рудообразования. Месторождение Добровольное, Зауральский район. Изображение в обратно-рассеянных электронах, РСМА

Таблица 3.9 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 3.14.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)											
	O	Si	P	S	Cl	Ca	Ti	V	Fe	Mn	U	Сумма
10	26,17	0,17	0,11	4,23	–	–	–	–	0,17	–	65,4	96,71
11	26,28	0,25	–	4,31	–	–	–	–	0,27	–	64,89	96,7
12	23,16	0,22	0,06	3,89	–	–	0,09	–	–	–	61,84	90

Третья разновидность оксида урана, представленная выделениями, имеющими микронные размеры, выявлена внутри крупных, хорошо ограненных кристаллов и крупных плотных агрегативных скоплений кристаллов пирита (Рисунок 3.15, Таблица 3.10). В последнем случае кристаллографические границы агрегата выражены слабо, и их выделения имеют облик конкреций. Совместно с ураном устанавливаются в повышенных содержаниях титан, торий, кальций, цирконий и иттрий. Вкрапленность оксида урана всегда приурочена к центральным частям пиритовых выделений.

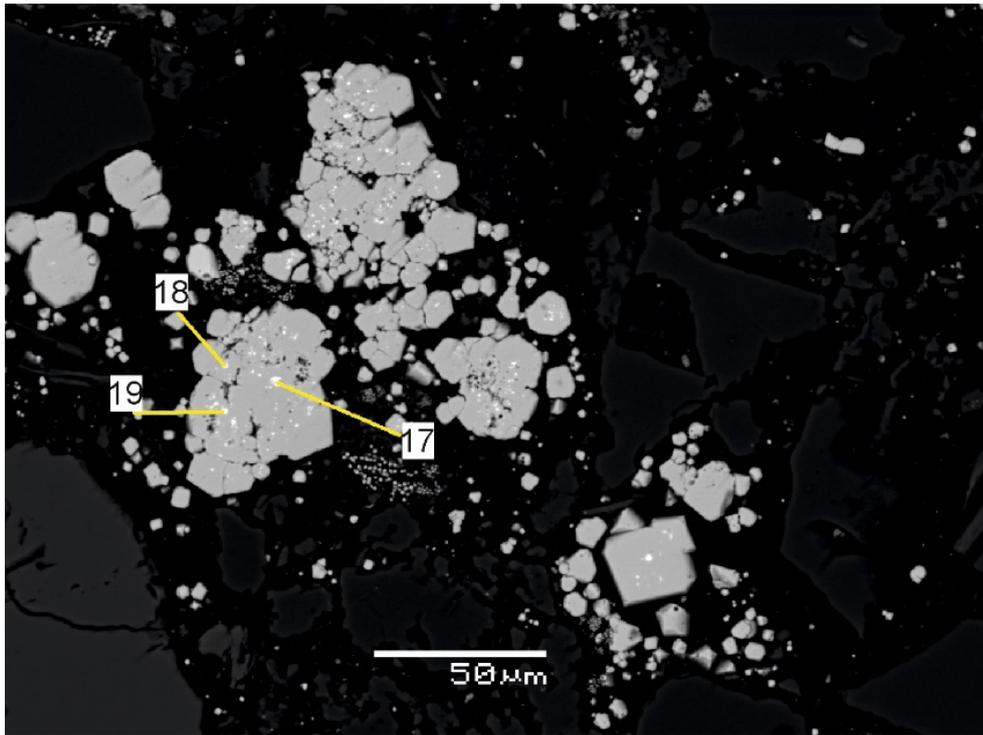


Рисунок 3.15 Урановая минерализация третьего типа в крупных агрегатах пирита. VII стадия рудообразования. Месторождение Добровольное, Зауральский район. Изображение в обратно-рассеянных электронах, РСМА

Таблица 3.10 – Результаты микронзондовых анализов, к Рисунок 3.15.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)						
	Al	Si	P	S	Ca	Fe	U
17	0,35	0,33	0,16	28,03	0,9	25,17	28,35
18	0,14	0,44	0,11	32,67	0,64	28,44	22,91
19	0	0,34	0,13	32,74	0,85	28,42	25,64

В результате детальных минералогических исследований руд месторождений Зауральского региона установлены следующие закономерности:

- Урановая минерализация представлена минеральными формами, преимущественно оксидного состава.
- Выявлена пространственная связь урановой и сульфидной минерализации, в том числе фиксируется их совместная кристаллизация.

Каждая стадия характеризуется определенными преобразованиями растительного органического вещества, к которым относятся гуминовые кислоты, играющие определенную роль при рудогенезе.

3.4. Роль гуминовых кислот в рудогенезе

Одним из продуктов окислительного преобразования растительных остатков при диагенезе являются гуминовые кислоты, которые относятся к коллоидным соединениям. В их

строении присутствуют функциональные группы, способные связывать уран при наличии железа, алюминия и ортофосфорной группы (PO_4^{3-}), образуя органоминеральный комплекс, который может мигрировать на значительные расстояния (Макаров, 2009).

На месторождениях Витимского района на многочисленных радиографиях вуалевидная засветка радиоактивности распространяется, в том числе, и над глинистым цементом, в котором отсутствуют видимые растительные остатки. Согласно результатам изучения органического вещества, на Хиагдинском и Вершинном месторождениях Витимского района (Успенский и др., 1985) в составе растительного органического вещества в большом количестве присутствуют гуминовые кислоты, которые являются продуктом окислительных преобразований растительных остатков при диагенезе.

На месторождении Вершинное урановая минерализация выявлена не только в рудных песках, но и в трещиноватом граните. В породах фундамента урановый минерал формирует обильную вкрапленность, округлой, глобулярной формы, иногда собранные в агрегаты с образованием корковидных скоплений (Рисунок 3.16). В составе уранового обособлений определяются высокие концентрации фосфора и кальция, а также кремния и алюминия. Кроме того, фиксируется значительное количество редких земель, в меньших количествах – титан, сера и железо.

Изучение руд с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) позволило выявить на месторождении Вершинное (Хиагдинское рудное поле) аморфное углеродсодержащее вещество с повышенным содержанием U, Ca, P, Al, Si, Mg, Fe, S. Подобное вещество присутствует не только в глинистом цементе оруденелых песчаников, но в единичном случае диагностировано вдоль трещины в гранитоидах фундамента на расстоянии до 0,5 м от контакта с осадками (Особенности ..., 2014). В рудных песках это крупное многокомпонентное гелеподобное обособление с углеродом содержит большое количество элементов, в том числе U и Ca (Рисунок 3.17А). В трещине гранита также диагностировано подобное оруденелое аморфное углеродистое вещество с повышенным содержанием U, Ca, P, Ti, Mg, Fe, S, Zr (Рисунок 3.17Б). Полученные для данного вещества диффузные кольцевые отражения графита на МДК свидетельствуют об очень слабой раскристаллизации вещества или его аморфности. При микронном исследовании рудного образца, взятого из трещины гранита, обнаружено глобулярное строение этого вещества, в центре расположено округлое выделение углерода, окаймляемое полями U, Ca и P, распространение которых полностью совпадает (Рисунок 3.18). Во внешней зоне этого образования также фиксируются Si и Al. Учитывая данные о том, что гуминовые кислоты являются аморфными соединениями (Манская, Дроздова, 1964) и способны образовывать органоминеральные комплексы с P и U в присутствии Al и Si (Макаров, 2009), изученные нами обособления можно отнести к гуминовым веществам. По данным исследований

специалистов-почвоведов (Макаров, 2009), гуминовые кислоты совместно с алюминием, кремнием, фосфором и ураном мигрируют в водных потоках и образуют устойчивые комплексные соединения.

Форма выделений глобул нингиюита, обнаруженная нами в трещине гранита, визуально похожа на коккоидные тела бактерий, в связи с чем ряд специалистов считают, что это, возможно, результат бактериальной деятельности (Ископаемые ..., 2011).

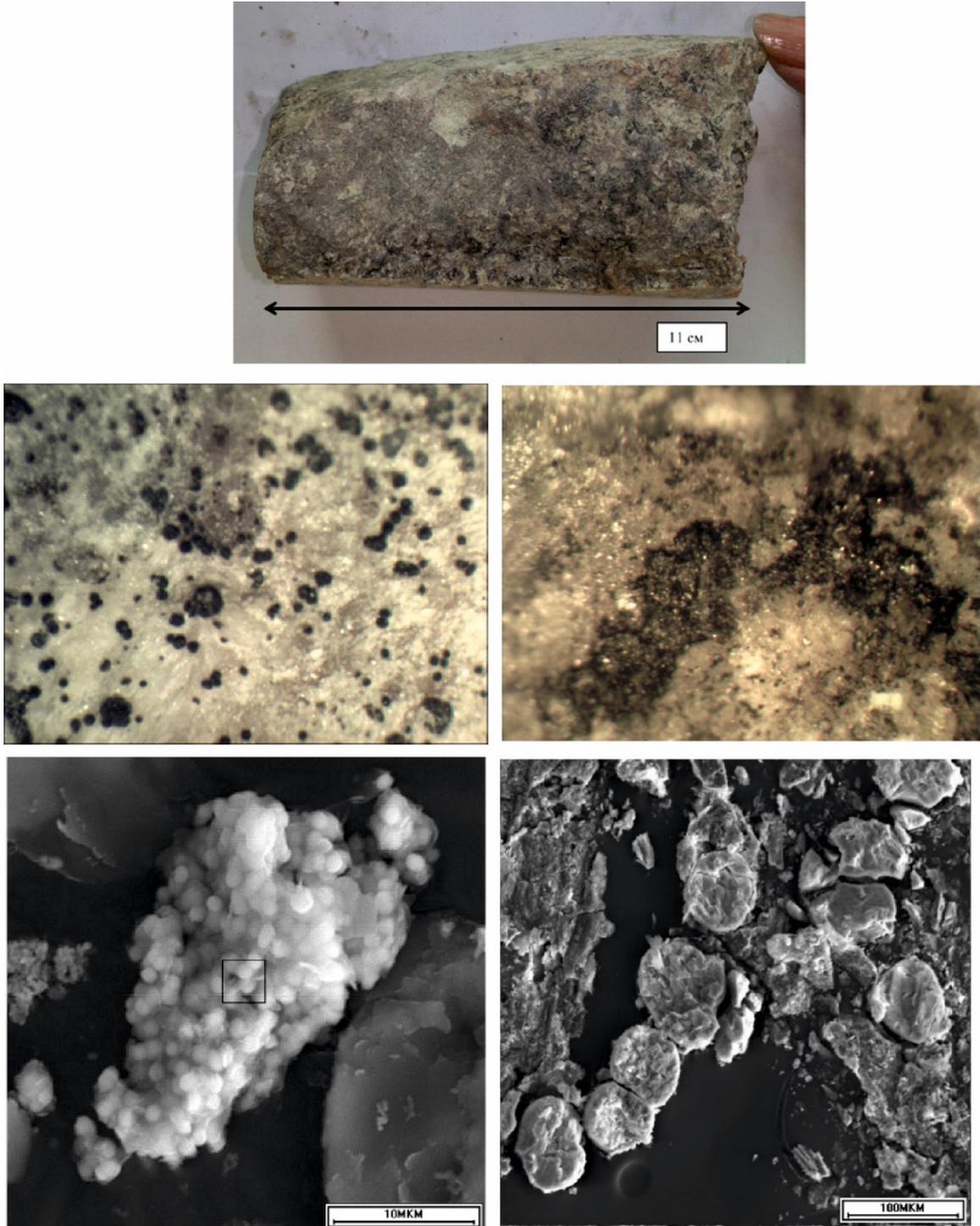


Рисунок 3.16 Глобулы уранового минерала, развитые в трещине гранита. Верхний ряд – общий вид образца; средний ряд – фото под бинокляром, увеличение 60; нижний ряд – фото в растворе электронном микроскопе

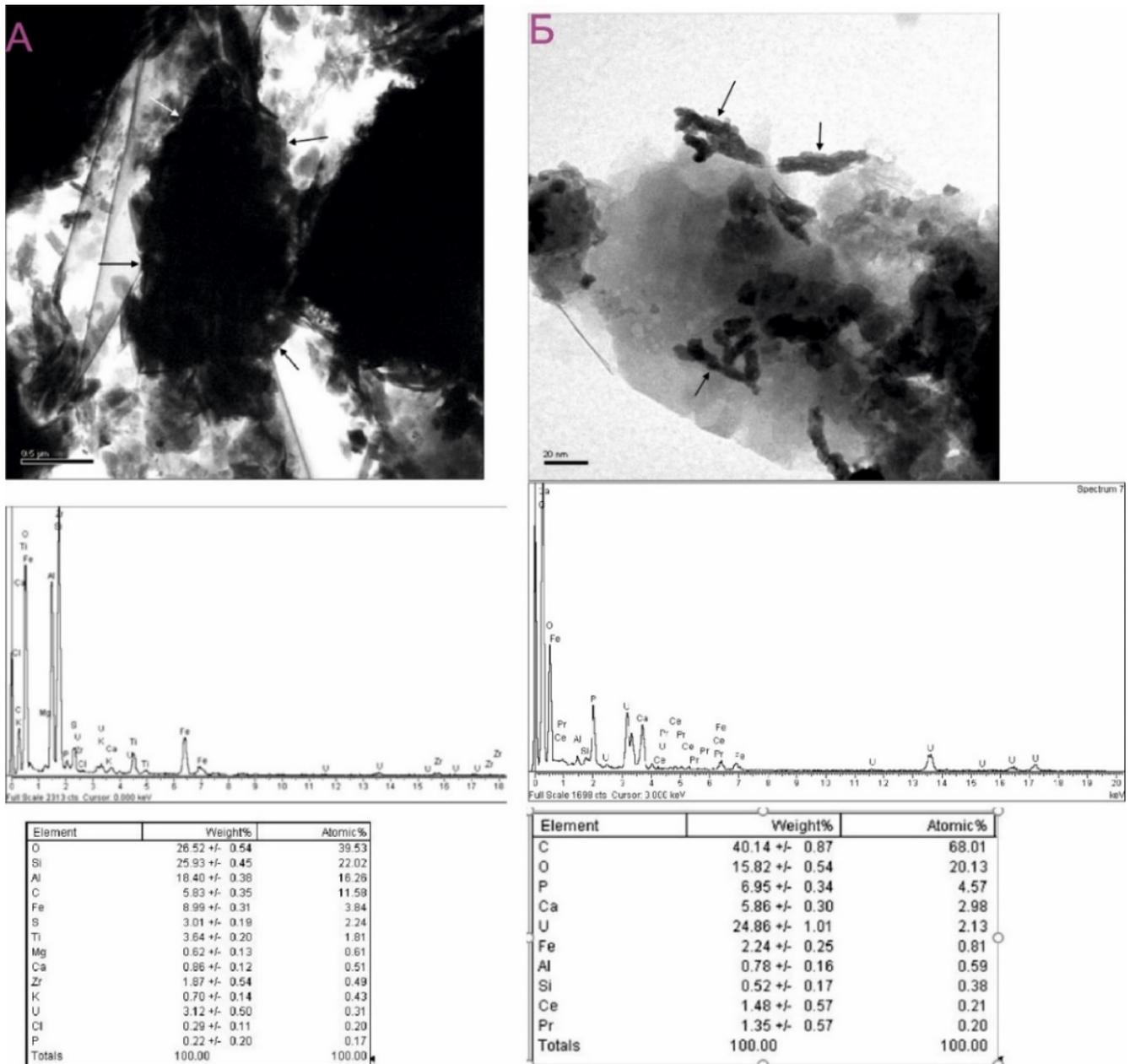


Рисунок 3.17 Тождественные формы выделений практически аморфного кальциевого фосфата урана и углеродистого вещества, обогащенные U, Ca, P, K, Sr, Zr, Ti, Fe, S, Al, Si, Cl.

Реплики рудного и углеродистого вещества: А – из оруденелых песков, Б – в трещиноватом граните. В таблицах приведены количественные соотношения выявленных элементов. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)

На месторождениях Зауральского региона, в частности, на Далматовском при детальном минералогическом исследовании растительного детрита В.А. Успенским (ВИМС) и М.В. Нестеровой (ИГЕМ) установлено, что урановая минерализация представлена несколькими разновидностями настурана и коффинитом. Одна из разновидностей настурана развивается по растительному остатку и пириту и псевдоморфно их замещает. Также глинистый цемент пропитан органоминеральными соединениями, которые авторы исследований отнесли к гуминовым кислотам (Сащенко и др., 2022).

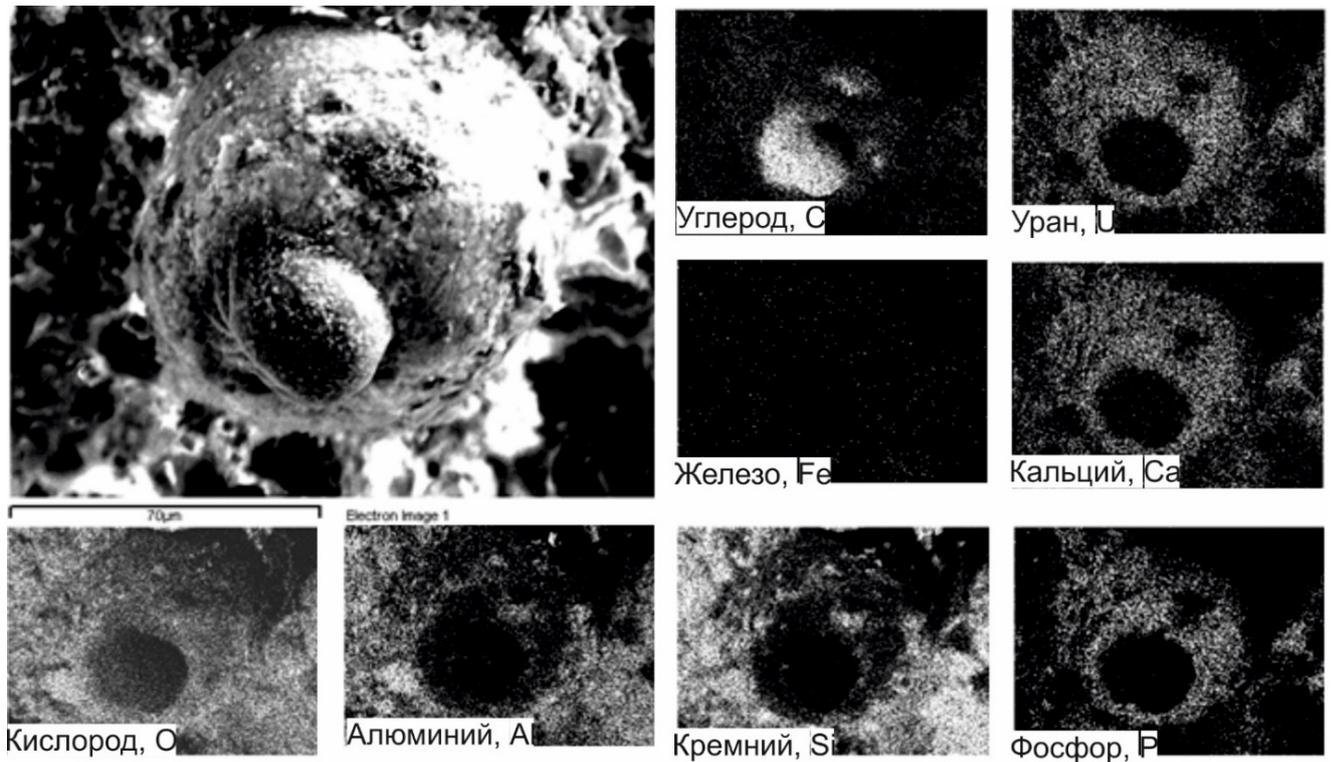


Рисунок 3.18 Глобулярное выделение нингюита в тесном сростании с округлым обособлением углеродистого вещества, из трещинчатого гранита. Месторождение Вершинное. Характер распределения элементов в характеристическом рентгеновском излучении. Изображение в обратно-рассеянных электронах, РСМА. По Г.А. Тархановой (Особенности ..., 2014)

Таким образом, помимо растительной органики, при формировании руд Витимского, а также Зауральского районов, т.е. тех урановорудных регионов, на которых рудовмещающие отложения находятся на стадии диагенеза, существенную роль играли гуминовые кислоты. Сформированные органоминеральные комплексы гуминовых кислот и металлов пропитывали глинистый цемент, тем самым формируя промышленные концентрации урана

Проведенные исследования пространственных соотношений преобразований растительного детрита и накоплений урана обобщены в Таблица 3.11.

Таким образом, при рассмотрении стадийности накопления рудовмещающих отложений в Зауральском и Витимском районах установлено, что геохимические условия диагенеза предполагают формирование сульфидных минералов. На стадии седиментогенеза происходит накопление растительного материала и его начальное разложение в восстановительных условиях торфяников либо торфяных болот. Учитывая характер распространения элементов, форму нахождения дисульфидов железа и урановых концентраций, нами условно выделена следующая последовательность преобразований растительного вещества и накоплений урана и сопутствующих элементов (P, Ca, Fe, S):

1. Экзодиагенез (седиментогенез и диагенез: стадии I–VI).

Стадия I. В поверхностных условиях, с неограниченным доступом кислорода, растительные осадки преобразуются в застойных условиях до торфяной стадии. Накопления

урана приурочены к краевым частям растительных остатков и имеют сорбционную природу, его содержания достигают 1,6 %.

Стадия II. Сорбционные накопления урана (1,4 %) распространяются по всему растительному детриту, что сопровождается его обогащением серой биогеной природы (3,12 %). Минеральные формы сульфидов железа не формируются, также не происходит обогащение растительности элементами, сопутствующими урану.

Стадия III. В отложениях начинают свою жизнедеятельность анаэробные, преимущественно сульфатредуцирующие бактерии, что обуславливает формирование дисульфидов железа на начальной стадии только в клеточной структуре растительной ткани (содержание S и Fe увеличивается до 14 %). Урановые накопления сохраняют сорбционную природу, его содержание в пределах растительности не изменяется (1,64 %).

Примерно на границе II и III стадии растительное вещество начинает преобразовываться до буроугольной стадии.

Стадия IV. Фрамбоиды пирита практически полностью псевдоморфно замещают растительный остаток, в том числе непосредственно растительную ткань, а также развиваются в цементе песчаников. Содержание урана увеличивается с 1,4 до 10 %, что связано с формированием его минеральных форм. В то же время увеличиваются концентрации элементов-спутников урана (%), таких как P (2,3), Ca (1,9), Si (5,6) и Al (4,5).

Стадия V. Поликомпонентные ураноносные гели постепенно кристаллизуются до минеральной формы нингиоита, что, как правило, происходит в тесной ассоциации с дисульфидами железа. Пирит образует крупные фрамбоиды как в цементе, так и непосредственно в растительном остатке, концентрации серы и железа достигают 30 %. Содержания элементов составляют (%): урана – 21, P – 6,1, Ca – 7, Si – 9 и Al – 7.

Стадия VI. В связи с длительностью диагенеза дисульфиды железа образуют крупные кристаллические агрегаты. Фиксируется совместное выпадение пирита и оксидов урана, где последний заключен в центре кристаллов дисульфидов железа. Содержание уран достигает 30 %.

3. Эпигенез.

Стадия VII. На месторождениях Витимского района эпигенетические процессы связаны с поступлением урансодержащих кислородных вод. В инфильтрационном потоке совместно с ураном привносятся кальций, кремний, алюминий и ортофосфорная группа. Они в сочетании с гуминовыми кислотами образуют устойчивые органоминеральные комплексы. При их поступлении возможно замещение поликомпонентными растворами растительных остатков.

Для месторождений Зауральского района характерен длительный рудообразующий процесс с неоднократным поступлением кислородных урансодержащих вод в породы, которые

соответствуют поздней стадии диагенеза. В результате в цементе рудовмещающих отложений формируются правильные минеральные агрегаты оксида урана нескольких генераций.

Таким образом, для каждой из рассматриваемых стадий литогенеза и выделяемых этапов преобразования характерны определенные формы накопления и трансформации урана в ассоциации с растительным органическим веществом и другими элементами. Установлено, что по мере развития процессов диагенеза в пределах растительных остатков увеличивается содержание серы и железа – от 3 до 30 %, а также урана от – 20 до 30 %.

Обобщение материала главы второй и третьей позволяет нам более детально рассмотреть формирование урановых объектов в палеодолинах, где выявленные закономерности затухали на различных стадиях (Рисунок 3.19).

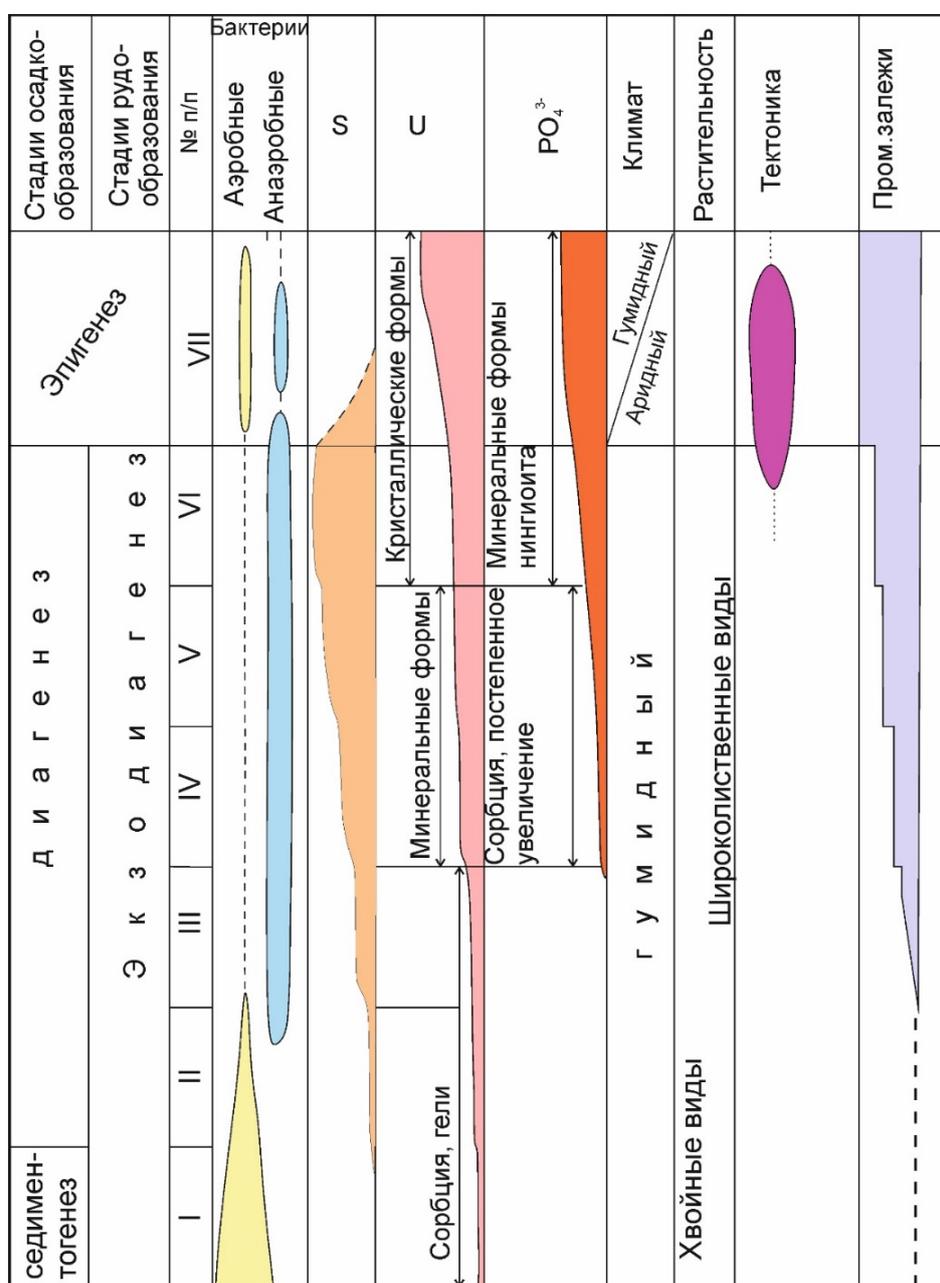


Рисунок 3.19 Последовательность преобразований осадочной толщи, вмещающей урановые концентрации

При изучении оруденения на рассматриваемых месторождениях нами установлено, что накопление урана во многом зависит от преобразования растительного органического вещества и происходит на всех стадиях седиментогенеза и диагенеза. Динамичность процессов зависит от условий окружающей среды, в частности, от деятельности микроорганизмов (сульфатредуцирующих бактерий), поступления кислорода и сульфат-иона, обводненности, условий захоронения и степени гумификации растительности.

Для стадии седиментогенеза, когда отложения преобразуются в аэробных условиях либо со слабым доступом кислорода, характерны сорбционные накопления урана только в краевых частях растительного остатка. В дальнейшем сорбция распространяется по поверхности всего детрита.

С началом погружения отложений и наступлением анаэробных условий начинают действовать сульфатредуцирующие бактерии, в результате чего растительный детрит обогащается биогенной серой без формирования дисульфидов железа. Для данного этапа диагенеза также характерны сорбционные накопления урана. По мере развития сульфатредуцирующих бактерий формируются сульфиды железа – сначала в клеточной структуре растительности, а затем псевдоморфно замещают растительный остаток. Для этих этапов диагенеза характерны сорбционные накопления урана, а также обогащение поликомпонентными гелями нингиоитового состава (Витимский район). На этой же стадии происходит кристаллизация сульфидов железа и фосфатов урана (нингиоит). Для стадий позднего диагенеза характерны кристаллические формы пирита и урановых минералов.

Помимо непосредственно растительной органики, при формировании руд Витимского, а также Зауральского районов существенную роль играли гуминовые кислоты, пропитывающие глинистый цемент и способные мигрировать совместно с ураном, фосфором и кальцием на значительные расстояния, а также бактериальные сообщества.

Полученные результаты позволяют сформулировать *второе защищаемое положение*.

На урановых месторождениях палеодолинного типа установлена ведущая роль растительного органического вещества и продуктов его изменений при последовательном формировании сорбционных, гелеподобных и минеральных скоплений урана, достигающих промышленных значений только при выявленной очередности прохождения всех стадий литогенеза – от седиментации до породобразования и наложенных эпигенетических процессов.

Таблица 3.11 – Последовательность преобразований растительного органического вещества и концентраций урана в рудовмещающих породах в Витимо-Каренгском, Витимском и Зауральском регионах

Стадии рудообразования	Стадии породобразования			Преобразование растительного органического вещества	Накопление урана
Экзогенез	Седиментогенез стадия I		Торфяная стадия	Преимущественно лигнино-целлюлозный комплекс. Гуминовые кислоты, гумусовые вещества. Торф	Сорбция только на поверхности растительного детрита
	Диагенез	Стадия II	Буроугольная стадия преобразования	Появление повышенных содержаний биогенной серы в пределах растительного остатка	Сорбция по всему растительному остатку
		Стадия III		Формирование дисульфидов железа в клеточной структуре растительной ткани	
		Стадия IV		Псевдоморфное замещение фрамбоидами сульфидов железа растительности, а также их развитие в цементе	Сорбция и восстановление урана дисульфидами железа
		Стадия V		Образование агрегатов дисульфидов в цементе и полное псевдоморфное замещение растительности	Образование минеральных форм сульфидов железа и урана (нингиоит)
		Стадия VI		Формирование кристаллической формы дисульфидов железа	Совместная кристаллизация минералов урана (преимущественно оксидов) и сульфидов железа (пирит)
Эпигенез	Стадия VII			Замещение растительного детрита растворами U-Ca-P-Al-Si состава	Уран в поликомпонентных растворах

4. ИЗМЕНЕНИЕ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА РУД ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СПВ

Урановая минерализация на гидрогенных месторождениях Витимского и Зауральского районов представлена различными агрегатами – от гелей до минеральных форм (Особенности ..., 2014; Сащенко и др., 2022; Дойникова и др., 2009; Дойникова и др., 2018). Как нами было доказано ранее, накопление и преобразование ее различных видов происходило при последовательном развитии стадий литогенеза. В свою очередь тип урановой минерализации, сопровождающейся преобразованием органического вещества и действием бактериальных сообществ, представляет собой ведущий фактор, влияющий на технологические особенности добычи методом сернокислотного скважинного подземного выщелачивания, в том числе на – степень извлечения урана из недр.

При этом для растворения каждой отдельной фазы требуется различное время закисления рудных блоков и концентраций кислоты. По данным лабораторных исследований, в первую очередь растворяются быстро окисляемые тонкодисперсные выделения (Пешков и др., 1993 ф), накопление которых происходит на ранних стадиях диагенеза (III и IV стадии, см. гл. 3). Менее благоприятными являются массивные выделения фосфатов, поздние совместные выделения урановых минералов и пирита, а также урановая минерализация, развитая по стенкам и в клеточной структуре и полостях растительных остатков, формирование которых происходит на V–VI стадиях диагенеза и на стадии эпигенеза (VII). Растворение и выщелачивание урана в этом случае возможно только при значительном времени окисления и разложении пирита и органического вещества.

Часть специалистов предлагает рассматривать период добычи полезных ископаемых как стадию техногенеза (Перельман и др., 1990). В этот период на месторождении образуются техногенные барьеры, в результате чего часть урана остается в недрах. В период добычи, или активного техногенеза, это приводит к отрицательным моментам, так как уменьшается степень извлечения полезного компонента. При этом после завершения отработки месторождения, в стадию пассивного техногенеза, наблюдается положительное воздействие техногенных барьеров. На них происходит концентрирование элементов, а не их рассеивание в окружающей среде. Под термином «техногенный барьер» понимается участок литосферы, на котором происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрация, в результате деятельности человека (Перельман и др., 1990).

Данные о наличии техногенных накоплений урана после отработки методом СПВ получены на эталонных месторождениях Кызылкумской провинции (Авдонин и др.1986; Кузькин и др., 2005). По данным предшественников, в результате изменения геохимической

среды в пласте образуется новая граница выклинивания зоны пластового окисления в результате техногенеза, вследствие чего формируется смещенная рудная зональность (Кузькин и др., 2005). Вновь образованная урановая минерализация характеризуется слабой раскристаллизованностью и приуроченностью к поверхности граней породообразующих минералов, и по сравнению с природной является менее контрастной.

На месте добычи урана, как показывают исследования, в рудовмещающих породах присутствуют интервалы с концентрациями металла, значения которых как выше, так и ниже исходных, а также интервалы с практически неизменными содержаниями. Это определяется особенностями вещественного состава и историей образования эпигенетического оруденения, обусловленного различием его формированием (см. главы 2 и 3). Нами проведен сравнительный анализ извлекаемости урана при освоении двух отечественных промышленных эталонных объектов палеодолинного типа.

4.1. Выщелачивание урана на месторождениях Витимского района

В пределах Хиагдинского месторождения Сосновской экспедицией № 130 на стадии предварительной оценки проведены два натуральных опыта по двухскважинной схеме – на 6-й (ПВ–82) и на 5-й (ПВ–89) залежах, после завершения которых проведено контрольное бурение (Грабовников, 1995; Пешков и др., 1993 ф). Кроме того, в настоящее время, при проведении промышленной добычи в пределах Хиагдинского месторождения, на 6-й и 7-й залежах после отработки части запасов также пробурены контрольные скважины с целью наблюдения за процессом выщелачивания.

Изучение и переинтерпретация архивных и современных материалов позволили автору выявить природу повышенных содержаний урана в рудовмещающих породах на месте проведения СПВ и связанной с этим недостаточной степени извлечения, а также установить роль углефицированного растительного вещества в этих процессах.

Детальное изучение колебаний содержаний урана как по разрезу, так и по площади на месте проведения ПВ-82 (Рисунок 4.1) позволило установить, что степень извлечения урана в различных частях разреза неоднородна. Для наиболее проницаемой части разреза она составляет 92–95 %, а для более плотных глинистых – 50–70 % и менее. По площади степень извлечения урана также неоднородна – уменьшается от 79 % вблизи нагнетательной скважины до 33 % по направлению к откачной.

Интервалы с содержаниями урана, превышающими исходные значения, отсутствуют в районе нагнетательной скважины и фиксируются, начиная с центральной части полигона. Следует отметить, что эти интервалы приурочены к горизонтам алевроито–глинистых пород, наиболее обогащенных растительным детритом.

Повышенные относительно начальных содержания урана приурочены к границе разнозернистых песков и более плотных глинистых разностей. На подобных горизонтах содержание урана увеличивается по сравнению с исходным на 40–60 %. Превышение содержаний урана в керне контрольных скважин над исходными обусловлено процессами переотложения в результате формирования техногенного геохимического барьера (Авдонин и др., 1986; Солодов и др., 1994).

Для изучения процессов, приводящих как к формированию переотложенной минерализации, так и «недовыщелачиванию» урана из руд были проведены оптико-петрографические, радиоизотопные и микронзондовые исследования в лабораториях ВИМСа.

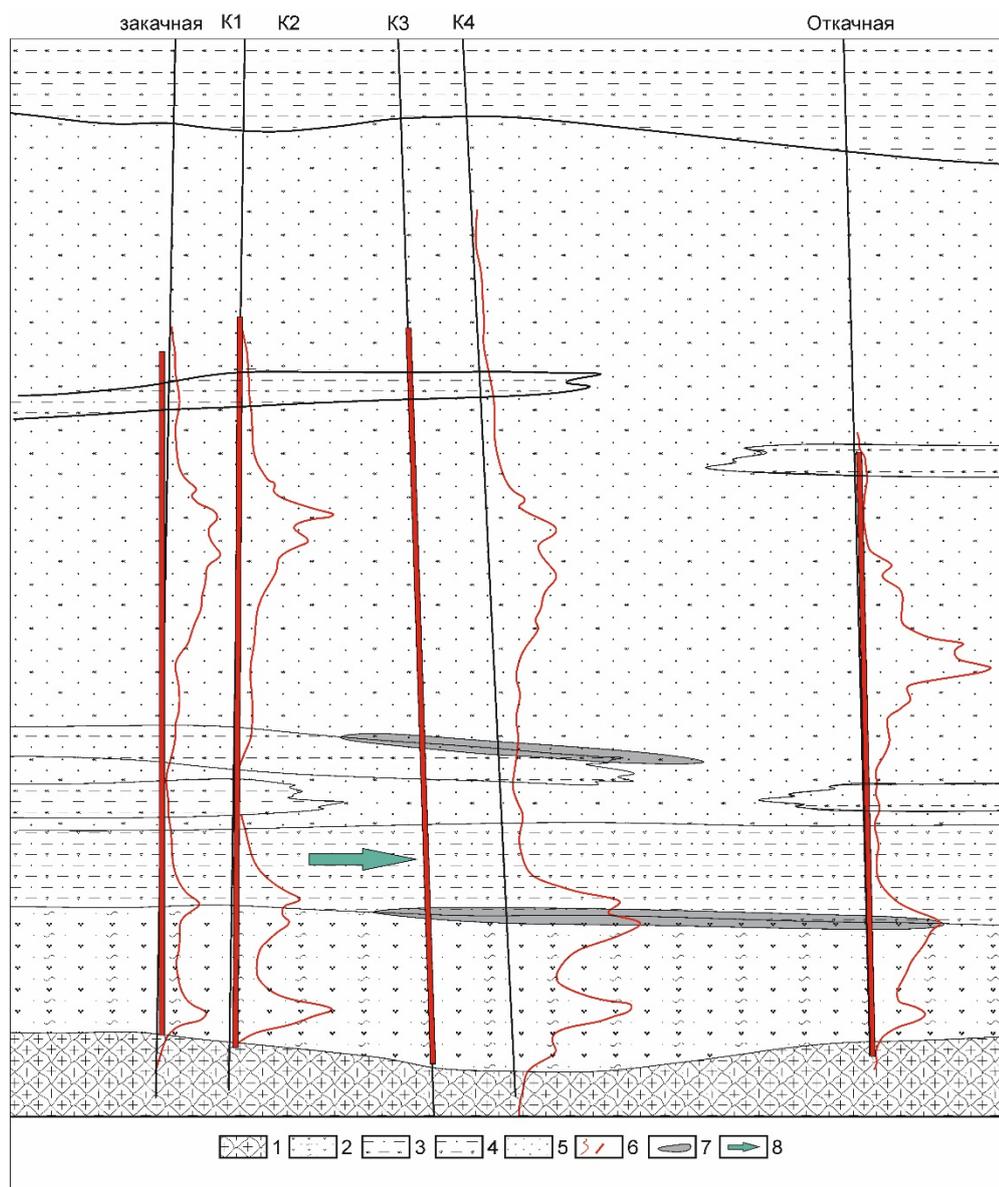


Рисунок 4.1 Геологический разрез на участке ПВ-82, по данным П.А. Пешкова (с дополнениями автора)

1 – кора выветривания по гранитам; 2 – разнозернистые глинистые пески; 3 – алеврито-глинистые породы; 4 – мелкозернистые пески; 5 – гамма-картаж и рудоностная зона; 6 – зона переотложения урана; 7 – направление движения выщелачивающего раствора

Для определения природы высоких содержаний урана (исходные или переотложенные концентрации) на месте проведения добычи был проведен сравнительный анализ вещественного, минерального элементного и изотопного составов пород до и после проведения выщелачивания. В том числе был использован коэффициент радиоактивного равновесия (КРР), рассчитываемый как отношение ^{226}Ra к ^{238}U . По данным В.И. Малышева и А.Е. Бахура, значение отношения ^{226}Ra к ^{238}U может иметь следующее объяснение: значение КРР =1 означает отсутствие миграции изотопов в течении последних 10 тыс. лет; значение КРР >1 – привнос Ra или вынос U; значение КРР <1 – вынос Ra или привнос U (Малышев, 1981; Радиографические ..., 2017). Природные руды месторождений Витимского района характеризуются установившимся радиоактивным равновесием (Уран ..., 2010; Пешков и др., 1993Ф), т.е. значением КРР около 1, при этом довольно часто встречаются значения немного ниже 0,8–0,9. При разработке месторождений методом скважинного подземного выщелачивания с применением серной кислоты уран из руд выщелачивается, а радий остается в недрах (Геотехнология ..., 2017). Таким образом, обстановки при значении КРР <1 и значительном преобладании радия соответствуют процессам техногенного накопления урана.

В рудовмещающем горизонте контрольных скважин по данным РСА выделяются области с содержаниями урана и молибдена значительно меньше исходных, а также близкие или превышающие исходные значения (Рисунок 4.2).

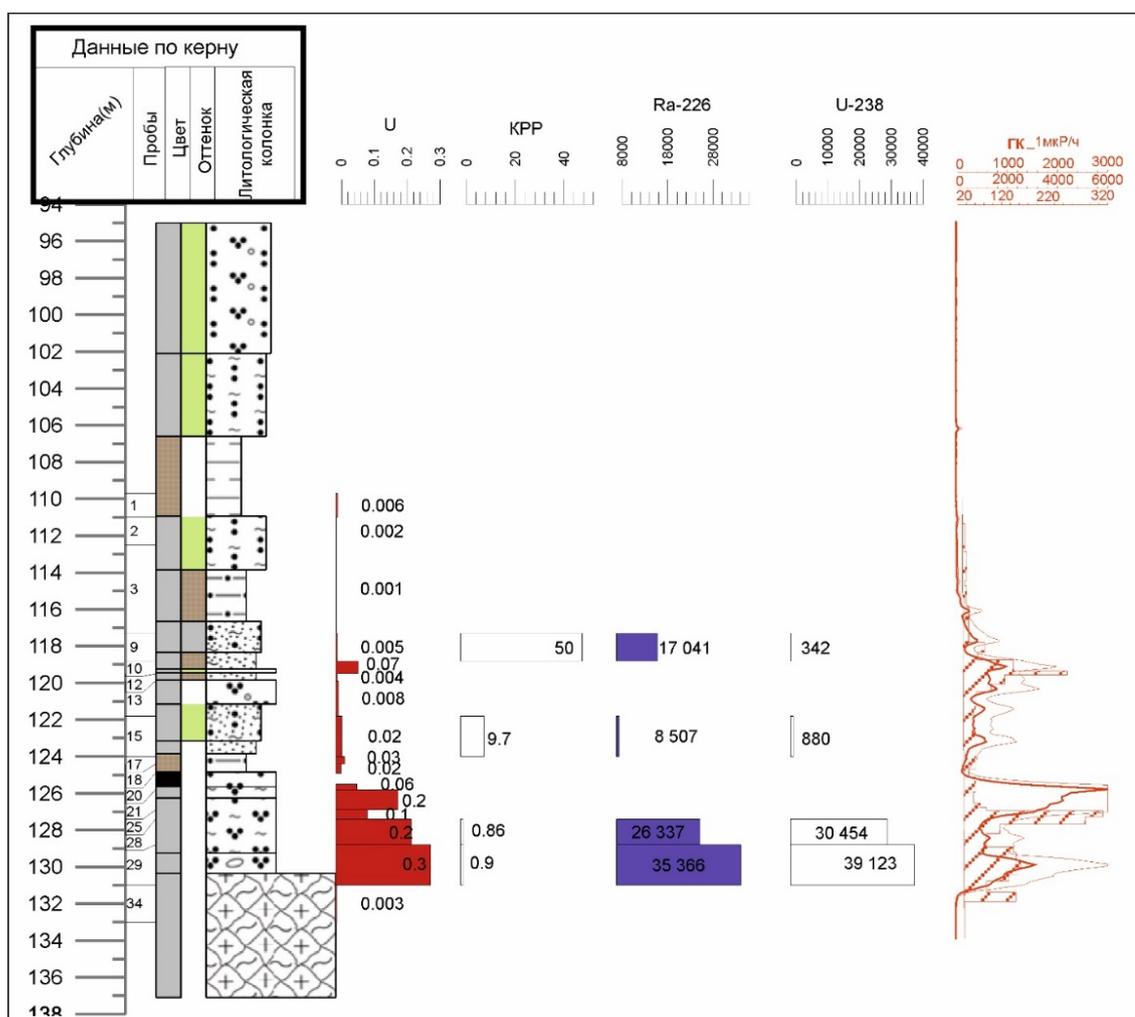


Рисунок 4.2 Литологическая колонка рудовмещающего горизонта на месте проведения добычи урана методом скважинного подземного выщелачивания

Для участков с низкими содержаниями урана в тысячные доли процента, характерны значения KPP от 3 до 50. При этом, согласно кривой гамма-каротажа, это интервалы с первично высокими содержаниями урана, т.е. фиксируется процесс выщелачивания урана. При KPP = 9,67 содержание урана составляет 0,02 %, а при KPP = 49,8 – 0,005 %, т.е. они отличаются на порядок. Проба с KPP = 49,8 ($C_U=0,005$ %) характеризует интервал мелкозернистого песка с прослоями алеврита темно-серого до черного. Проба с KPP = 9,67 ($C_U=0,02$ %) характерна для мелко-среднезернистых серых песков с многочисленными прослоями слабо уплотненных алевритов. Значительно лучше выщелачиваются менее глинистые мелкозернистые пески, в том числе с органикой, которая и определяет их черный цвет. При изучении методами микрондальной микроскопии в интервале не установлены урановые минералы. Незначительные содержания урана (до десятых долей процента) характерны только для обломочных зерен циркона (Рисунок 4.3, Таблица 4.1) и оксидов титана (Рисунок 4.4, Таблица 4.2), заключенных внутри зерен кварца и полевых шпатов, а также в выделениях органики. Выявлены в различной степени разъеденные стяжения стронцийсодержащего барита с примесью алюминия, кремния (Рисунок 4.5, Таблица

4.3), но без включений урана. В окружающей барит глине с растительным детритом содержание остаточного урана составляет 0,25 % (Рисунок 4.5, спектр 4, Таблица 4.3). Как правило, содержания урана характеризуются отсутствием или крайне низкими содержаниями кальция и фосфора.

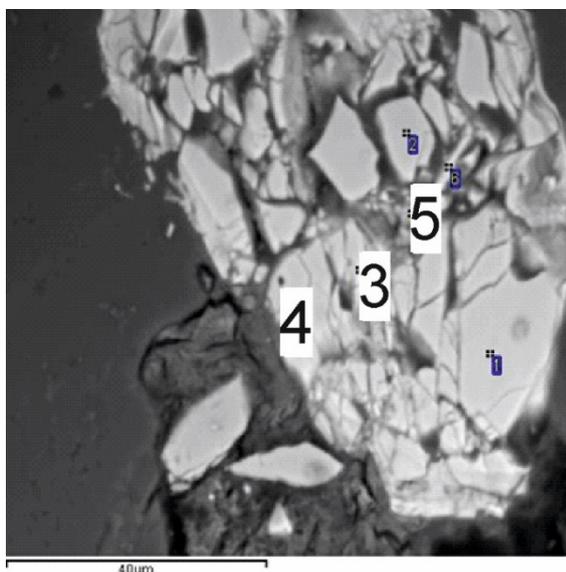


Рисунок 4.3 Остаточные содержания урана в акцессорном цирконе на месте проведения выщелачивания. Хиагдинское месторождение. РСМА

Таблица 4.1 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 4.3.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)									
	Si	P	S	Ca	Fe	Zr	Hf	U	O	Сумма
3	15,4	-	-	0,11	0,14	45,5	1,85	0,8	35,5	99,4
4	10,6	0,7	0,6	0,38	0,65	47	1,04	4,2	34,1	99,3

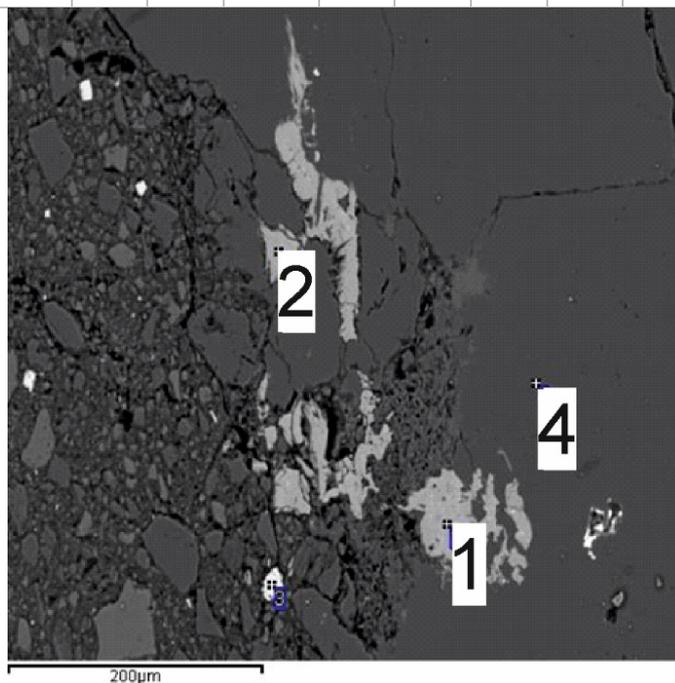


Рисунок 4.4 Остаточные содержания урана в акцессорном оксиде титана на месте проведения выщелачивания. Хиагдинское месторождение. РСМА

Таблица 4.2 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 4.4.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)							
	Si	P	Ca	Ti	Fe	U	O	Сумма
1	1,4	-	0,08	53,7	0,94	1,14	39	97,7
2	0,9	-	0,07	55,5	0,9	0,55	39	98,5
3	46,4	-	-	0,03	0,14	-	53	99,7

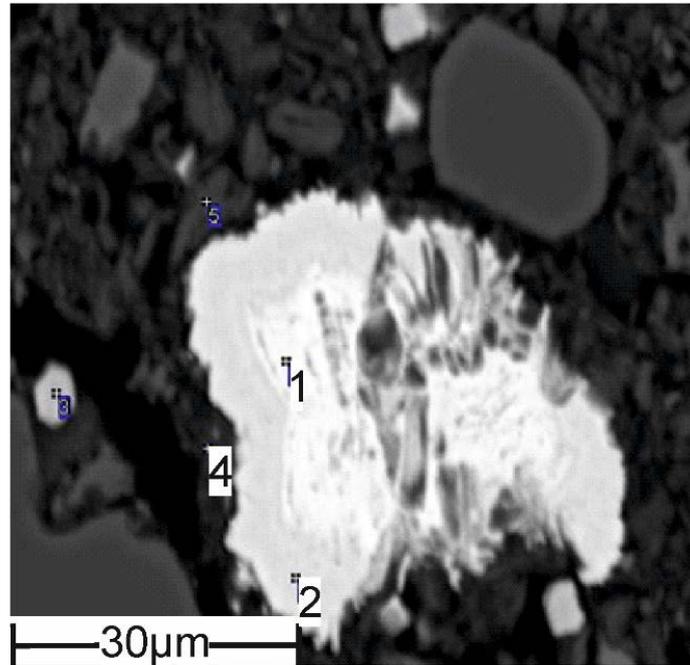


Рисунок 4.5 «Разъеденные» стяжения барита, не содержащие уран, в месте проведения сернокислотного выщелачивания. Хиагдинское месторождение. РСМА

Таблица 4.3 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 4.5.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)														
	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe	Sr	Zr	Ba	Hf	U	O	Сумма
1	0,1	0,28	-	14,47	0,07	0,54	0,89	0,1	8,57	0	45,86	-	-	27,1	98,2
2	0,1	0,24		15,82	0,58	1,25	0,44	0	16,57	0,07	30,12	-	-	31,61	97,11
4	9,55	11,64	0,1	3,66	0,84	0,63	0,1	0,71	1,63	0,12	5,04	0,33	0,25	29,33	64,65
5	15,65	19,56	0,15	0,42	0,04	0,03	-	2,08	-	-	0,61	-	-	37,93	76,85
№	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Zr	U	Сумма
3	0,04	0,13	0,4	48,59	0,04	0,06	0	0,03	0,08	0	43,47	0,24	0,16	-	93,25

В нижней части разреза, представленной преимущественно серым разнозернистым песком с линзами алеврита, с примесью дресвы и гальки гранитного состава, среднее содержание урана составляет 0,22 %, содержание молибдена – 0,023 %. Значение КРР составляет 0,58–0,9, что характерно либо для обстановок выноса (дефицита), либо для процессов слабого выщелачивания урана. Процессы слабого выщелачивания подтверждаются относительно

высокими содержаниями молибдена – на порядок больше, чем в вышележащих породах. Методами микронзондовой микроскопии установлено, что содержания урана от десятых долей процента до нескольких процентов фиксируются в разрушенных сульфидах железа и цинка (Рисунок 4.6, Таблица 4.4).

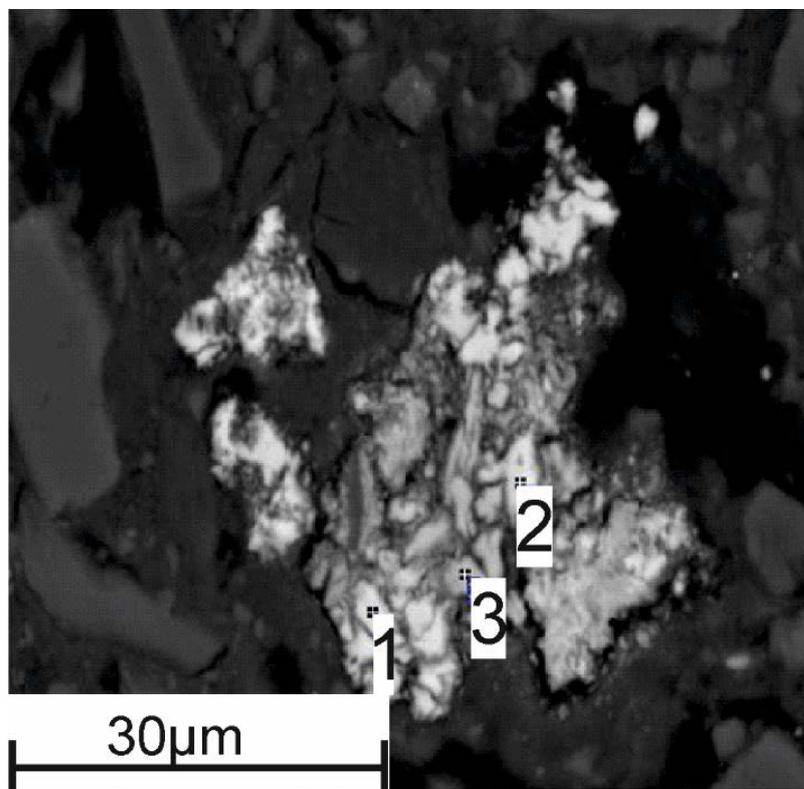


Рисунок 4.6 Разрушенная смесь сульфидов железа и цинка с незначительными концентрациями урана в цементе рудовмещающих песков. Хагдинское месторождение. РСМА

Таблица 4.4 – Результаты микронзондовых анализов, к Рисунок 4.6.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)														
	Na	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Co	Cu	Zn	U	Сумма
1	7,31	0,55	0,38	-	31,32	0,16	0,1	0	0,08	0,62	-	-	61,72	0,35	99,8
2	14,03	0,1	0,32	0,31	33,84	0,32	0,11	0,18	0,24	1,31	0,53	0,63	66,19	0	98,3
3	-	0,41	0,34	-	49,56	-	0,27	0,15	-	39,69	0,96	0,26	-	1,17	93,06

Минеральная фаза урана обнаружена внутри кварцевого зерна, где она замещает кристалл пирита (Рисунок 4.7, Таблица 4.5). Тонкие трещинки в кварце выполнены урановым минералом, развитым вокруг сульфида железа, что свидетельствует о наложенном характере урановой минерализации. Определенные в минерале высокие содержания урана (до 51 %) сопровождаются также повышенными содержаниями кальция и фосфора, однако они недостаточны для стандартных соотношений элементов в нингиоите, что свидетельствует о неполной раскристаллизации минерала. В минерале также присутствует примесь циркония, что часто отмечается для минералов нингиоита в первичных рудах Витимского района (Тарханова,

Прохоров, 2017; Особенности ..., 2014; Урановые ..., 2018). Рентгенографическим количественным фазовым анализом в породах определен минерал шестивалентного урана – скупит, который в основном является продуктом окисления, минералов четырехвалентного урана (Сидоренко, 1978). Все это позволяет заключить, что на данном интервале проявлены процессы окисления первичной минерализации без интенсивного процесса выщелачивания.

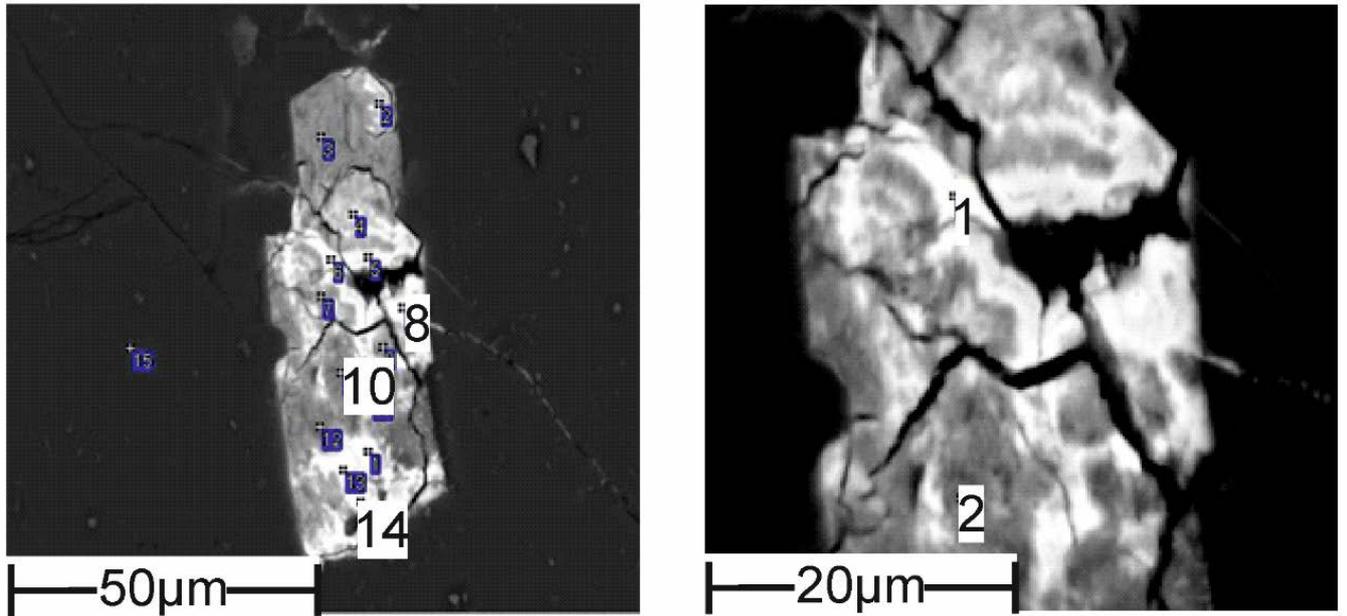


Рисунок 4.7 Вторичная оксидная фаза урана, осажденная на поверхность сульфида железа среди зерен кварца. Хиагдинское месторождение. РСМА

Таблица 4.5 – Результаты микронзондовых анализов, к Рисунку 4.7.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)													
	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Fe	Co	Zn	Zr	Hf	U	O	Сумма
1	0,18	0,63	2,9	3,48	2,2	1,07	2,8	0,08	-	2,2	0,16	48,42	20,4	84,79
2	0,29	1,05	15,3	1,5	16,85	0,37	15,0	0,38	0,16	0,83	0,11	15,6		68,08
8	0,08	0,59	3,6	3,33	1,58	0,9	1,68	0,05	0,19	3,85	0,65	45,5	20	82,39
10	0,21	0,94	1,87	1,33	16,9	0,52	22,0	0,62	0,24	1,07	-	19,4	40,3	100
14	0,07	1,02	3,66	3,12	1,64	1,84	0,64	0,19	0,19	1,31	-	50,9	20,03	84,78

В случае, когда основание осадочного разреза представлено мелкозернистым песком с значительной примесью глинистого вещества с неравномерным чередованием с прослоями алевролита, обогащёнными рассеянной тонкодисперсной органикой, содержание урана составляет 0,61 %, а значение КРР – 0,7–0,8. Цемент породы преимущественно каолинитовый с примесью гидрослюда, имеет неоднородную окраску от темно-коричневой до светлой, что обусловлено, по нашему мнению, пропиткой гуминовыми кислотами. В цементе встречаются отдельные фрамбоиды и скопления пирита, которые в различной степени разрушены. В образцах с содержаниями урана в сотые доли процента фиксируется незначительное разрушение пирита,

а в более богатых разностях (U 0,п %) данные процессы не наблюдаются. В случае преобладания глинистой составляющей над терригенной цемент не изменяется. При наличии более терригенных разностей фиксируется слабое воздействие кислоты на каолиновый цемент и фрамбоиды пирита, что выражается в «выпучивании» глины и тонких зазубринах на пиритовых агрегатах (Рисунок 4.8).

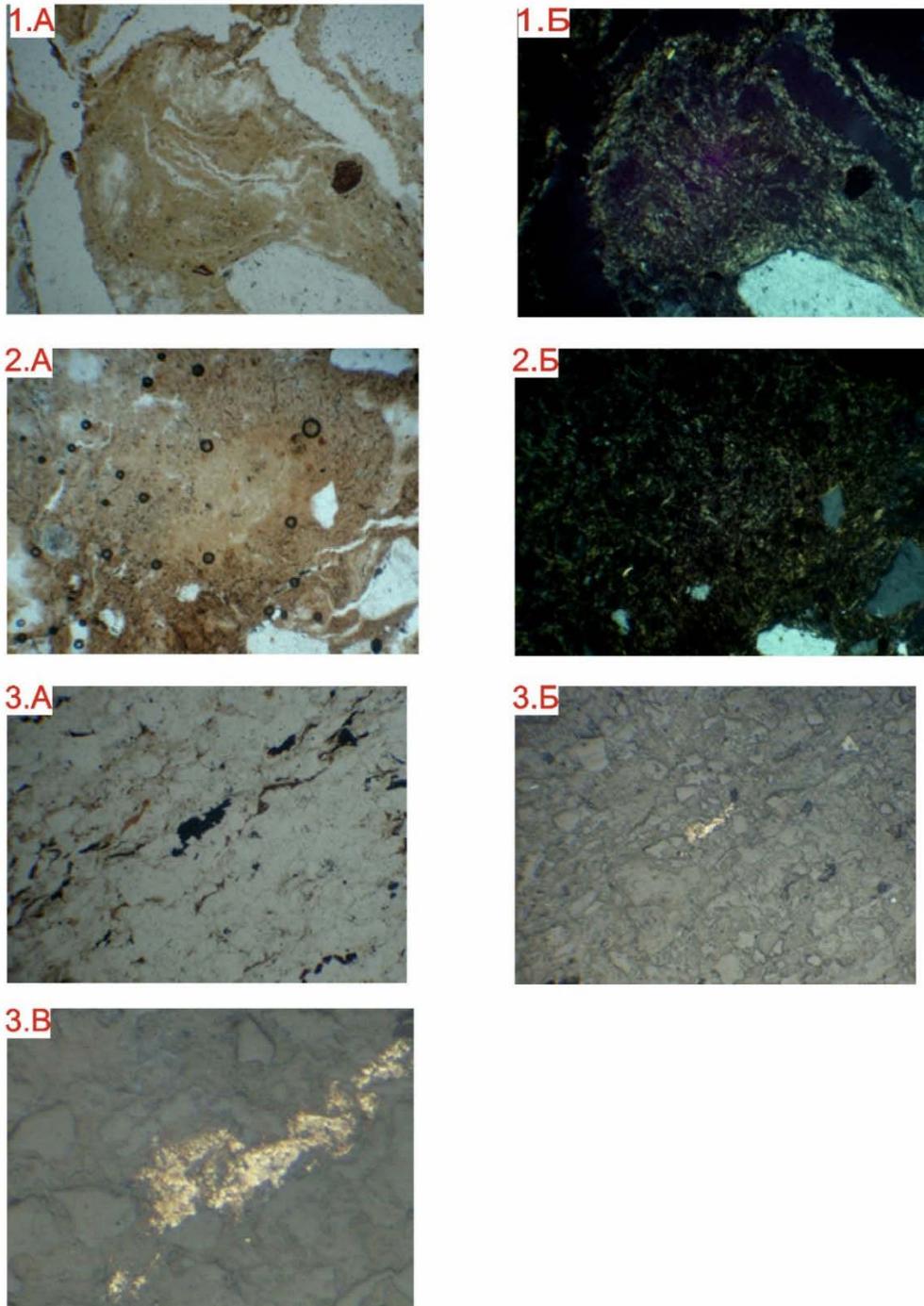


Рисунок 4.8 Вторичная оксидная фаза урана, осажденная на поверхность сульфида железа среди зерен кварца. Хиагдинское месторождение. РСМА.

1 – неизменный глинистый цемент; 2 – слабоизмененный в краевых частях глинистый цемент; 3 – агрегат зерен пирита, измененный только в краевых частях
 Фото шлифов: А – проходящий свет, николи параллельны, 1Б и 2Б – проходящий свет, николи скрещены, 3Б и 3В – отраженный свет, николи параллельны

В породах наблюдаются характерные трещины усыхания, возникшие после техногенного воздействия в результате набухания, а затем высыхания породы (Рисунок 4.9). Уран совместно с фосфором, алюминием, серой и железом равномерно распределен по глинистой массе. Таким образом, можно заключить, что степень воздействия выщелачивающих растворов в первую очередь зависит от количества глинистой составляющей.

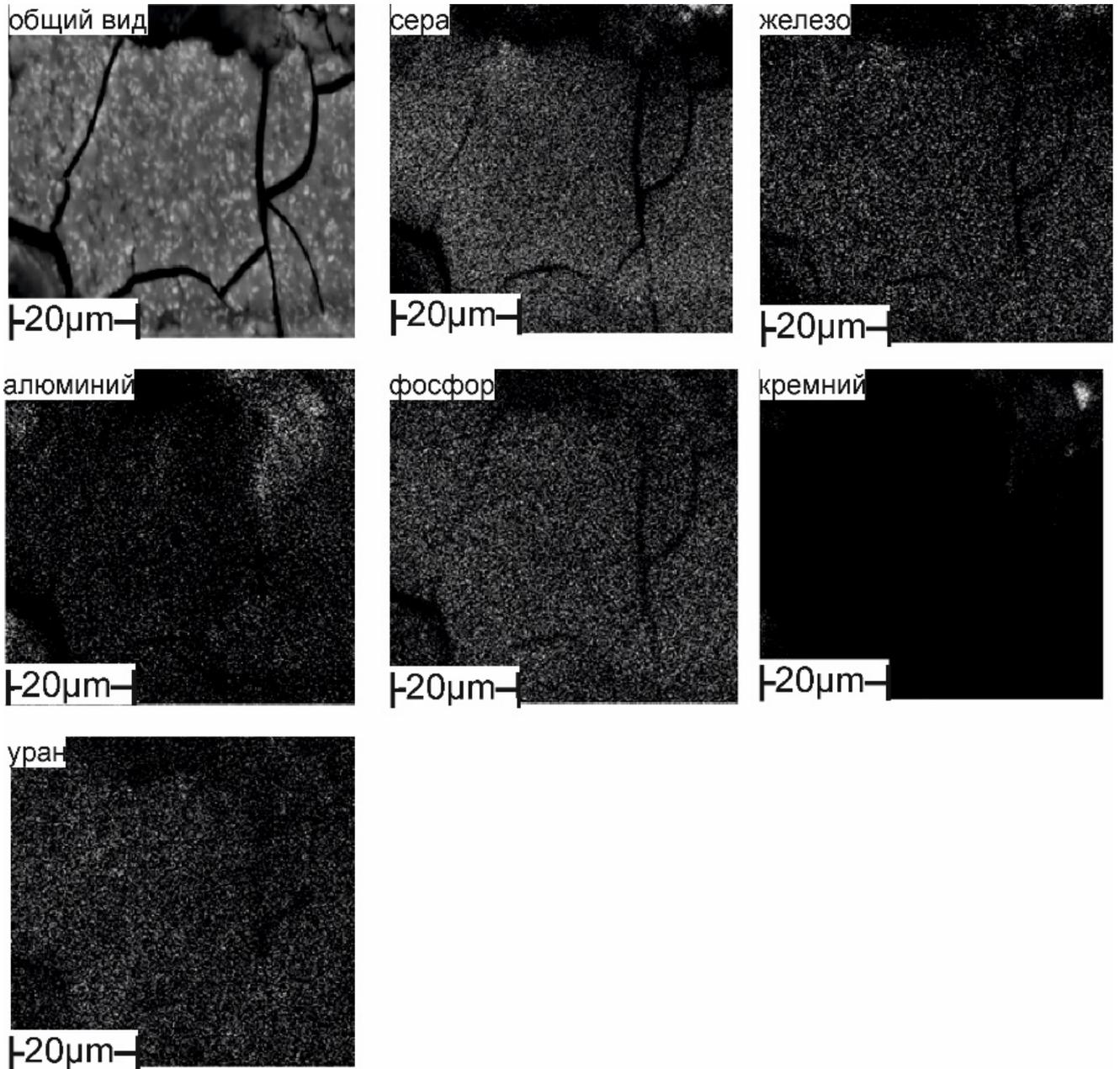


Рисунок 4.9 Характер распределения элементов в рудовмещающих породах с контракционными трещинами при проведении сернокислотного выщелачивания. Хиагдинское месторождение. Поля распределения элементов в характеристическом рентгеновском излучении, РСМА

Изучение образца микронзондовой микроскопией показало, что в глине обильно представлены скопления мелкого фрамбоидального пирита в ассоциации с кальций-фосфор-урановыми гелями, определяемыми содержаниями элементов (%): U – 13, P – 5,3, Ca – 2. Такие соотношения основных элементов в гелях отвечают нингиоитовому составу, но они, как правило,

многокомпонентные с примесью алюминия, кремния, железа, серы и циркония (Рисунок 4.10, Таблица 4.6). Редко обнаруживаются более раскристаллизованные образования с высокими уранинитовыми соотношениями – (U - 24 %, P - 8,75 %, Ca - 5,17 %) в черной глине (Рисунок 4.11, Таблица 4.7). Подобные соотношения характерны для первичных руд месторождений Витимского района (Особенности ..., 2014).

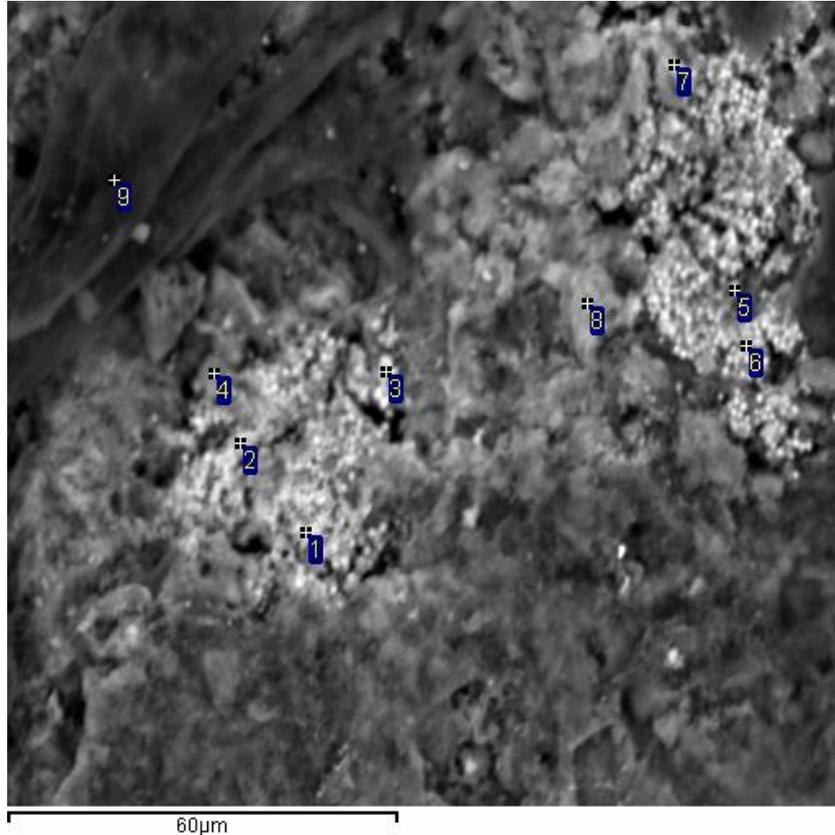


Рисунок 4.10 Ассоциация поликомпонентных твердых гелей уран-кальций-фосфорного состава с мелким пиритом, сохранившиеся в глинистом цементе после проведения СПВ. Хиагдинское месторождение. РСМА

Таблица 4.6 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 4.10.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)													
	Al	Si	P	S	Ca	Ti	Fe	Co	Zn	Sr	Zr	Hf	U	Сумма
1	1,09	0,56	3,13	29,46	1,04	0,31	25,96	0,33	0,1	0,8	0,34	0,28	7,13	71,12
2	1,34	1,58	2,16	29,63	0,74	0,26	26,11	0,32	0,2	-	0,35	0,29	5,31	68,62
6	0,6	0,6	1,55	23,3	0,6	0,16	28,6	0,27	-	1,81	0,41	-	4,05	62,14
Сп	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe	Zn	Sr	Zr	U	O	Сумма
3	0,15	6,67	8,98	5,62	4,22	0,05	1,96	5,68	-	1,48	0,72	12,66	34,9	84,26
4	0,22	6,92	12,13	1,67	9,15	0,33	0,4	8,2	0,21	-	0,51	3,96	39,65	84,14
5	-	0,23	0,5	0,24	3,06	0,08	0,2	13,79	0,12	-	0,03	1,18	10	29,67
8	0,31	5,04	11,66	4,95	4,27	0,21	1,93	6,13	0,09	2,44	0,69	12,77	36,41	88,77
9	-	2,76	4,98	1,43	3,5	0,17	0,25	3,72	-	-	0,54	3,64	17,42	39,24

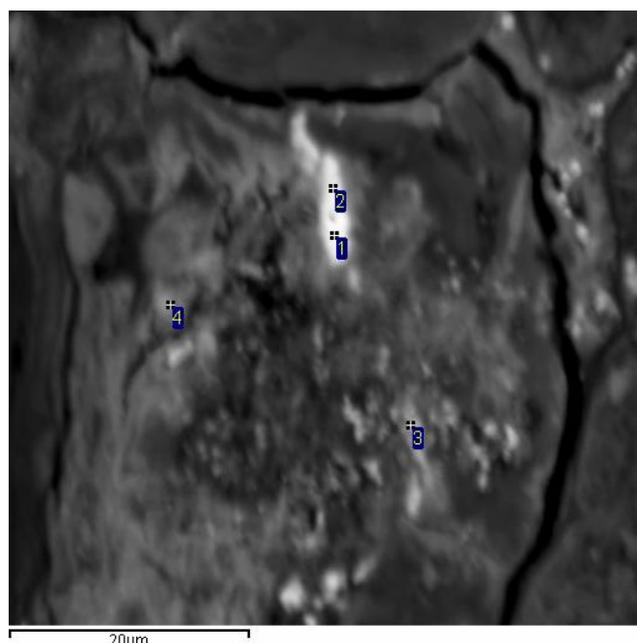


Рисунок 4.11 Раскристаллизованные гели с высокими ниогитовыми соотношениями Ca–P–U. Хиагдинское месторождение. РСМА

Таблица 4.7 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 4.11.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)													
	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe	Sr	Zr	Ba	U	O	Сумма
1	0,28	2,51	6,21	8,6	4,26	0,39	4,91	6,38	2,39	0,35	0,68	23,5	34,96	96,5
2	0,29	2,75	6,08	8,75	3,87	0,16	5,17	5,66	1,19	0,95	0,48	24,02	34,43	94,46
4	0,12	5,22	17,07	3,65	3,13	2,96	1,47	4,99	0,92	0,19	0,27	7,15	37,76	86
Сп.	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Mn	Fe	Sr	Zr	Ba	U	Сумма
3	0,31	3,4	7,47	2,15	21,58	0,31	1,13	0,03	17,65	1,05	0,18	0,36	6,59	62,47

Видимые органические остатки содержат уран в количестве от 2 до 4 % с фосфором и кальцием (Рисунок 4.12, спектр 4, Таблица 4.8). Наряду с запечатанными в углефицированной глине поликомпонентными урансодержащими гелями с пиритом (Рисунок 4.12, спектр 2, Таблица 4.8) встречены извилистые выделения стронцийсодержащего барита с изрезанными краями и повышенными содержаниями урана – до 2,73 %. Близкие содержания урана (2,88 %) определяются также в растительном остатке (Рисунок 4.13, Таблица 4.9), отличаясь лишь более высокими содержаниями фосфора. Вероятнее всего, глинистые участки с ураноносными гелями и содержания урана в органических остатках слабо подверглись процессам выщелачивания. При этом уран, наложенный на разъеденный барит, можно считать переотложенным.

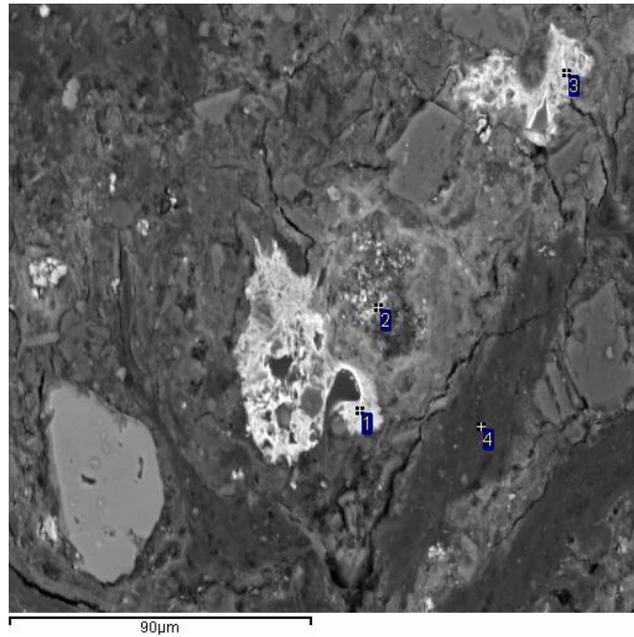


Рисунок 4.12 Стронций содержащий барит и уран в видимых органических остатках. Хиэгдинское месторождение. РСМА

Таблица 4.8 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 4.12.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)															
	Mg	Al	Si	S	K	Fe	Co	Zr	Hf	U	Сумма					
2	0,14	0,59	1,09	44,85	0,05	38,92	0,59	0,43	0,15	0,35	87,53					
Сп.	Al	Si	P	S	Ca	Ti	Fe	Co	Ni	Sr	Zr	Ba	Hf	U	O	Сумма
1	3,62	5,42	0,62	10,93	1,24	0,1	1,35	0,21	0,12	5,26	0,23	27,57	0,42	2,73	32,56	93,16
3	3,83	8,15	0,72	9,56	1,96	0,46	1,16	-	0,1	2,79	0,16	24,83	0,21	1,75	33,33	89,78
4	0,55	0,63	1,59	4,24	0,11	0,19	3,73	0,06	0,09	0,44	0,68	-	0,12	2,88	11,71	27,31

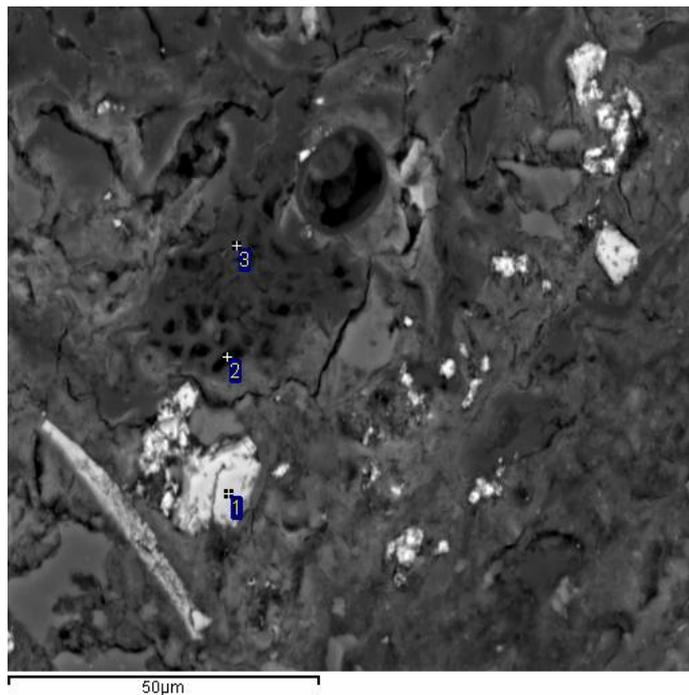


Рисунок 4.13 Сохранившиеся содержания урана в органическом остатке. Хиэгдинское месторождение. РСМА.

Таблица 4.9 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 4.13.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)													
	Al	Si	P	S	Ca	Fe	Co	Sr	Zr	Ba	Hf	U	O	Сумма
2	1,7	1,94	0,68	2,75	0,16	4,34	0,19	0,95	0,08	0,09	0,09	2,55	10,84	26,98
3	0,57	0,23	0,86	3,44	0,12	3,81	-	-	0,32	-	0,11	3,13	8,91	21,93
Сп.	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Cu	Zn	Zr	U	Сумма			
1	0,05	0,35	0,48	53,03	0,03	44,09	0,15	0,14	0,26	-	98,97			

Интервалы с минимальными содержаниями урана характерны для разреза, представленного наиболее грубозернистыми разностями. Горизонты с повышенным содержанием урана приурочены к основанию и частично к верхней части осадочного рудовмещающего разреза, представленного породами с повышенной глинистостью. Высокие концентрации урана связаны с растительным детритом и глинистым цементом, что характеризует их как остаточные содержания. В единичных случаях повышенные содержания урана обусловлены его переотложением на зернах барита (Рисунок 4.14, Таблица 4.10).

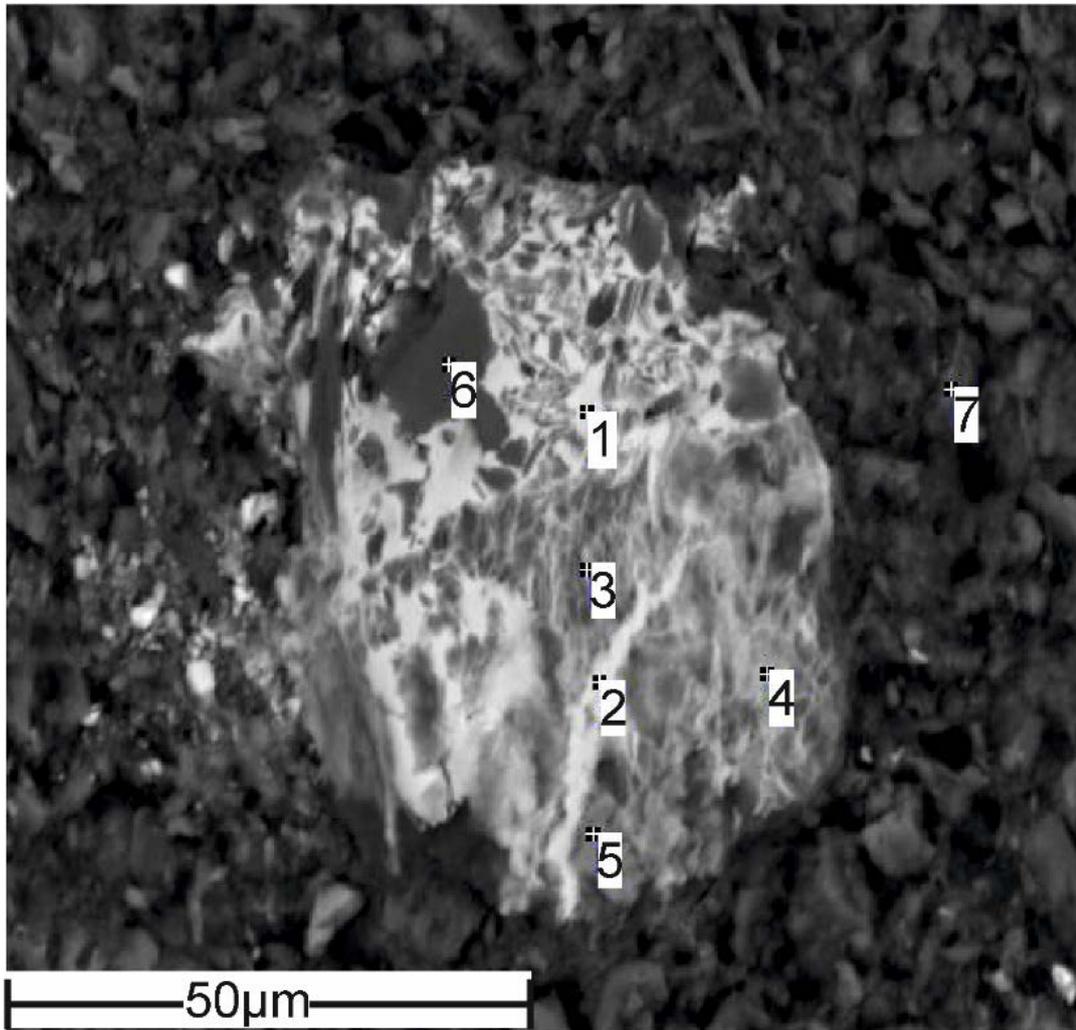


Рисунок 4.14 Псевдоцементное развитие барита с повышенными содержаниями урана в полиминеральном обособлении рудовмещающей породы после выщелачивания. Хиагдинское месторождение. РСМА

Таблица 4.10 – Результаты микронзондовых анализов, к Рисунок 4.14.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)														
	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe	Cu	Zn	Sr	Ba	U	O	Сумма
1	1,36	2,33	-	13,8	0,3	1,61	0,69	0,25	0,22	0,08	10,9	34,8	-	32,16	99,43
2	1,29	2,77	-	13,3	0,26	1,44	0,57	0,32	0	0,06	10	34,3	0,38	31,46	97,04
3	8,47	12,03	0,15	7,4	0,13	0,67	0,15	0,8	0,18	-	4,58	19,1	0,16	36,53	91,05
4	4,79	8,01	0,02	9,69	0,1	1,15	0,22	0,8	0,11	-	6,28	23,7	0,17	32,93	88,41
5	2,04	3,27	0,16	1,98	0,06	0,37	39,5	0,88	0,23	-	-	6,08	0,19	37,03	92,86
6	0,05	46,1	0,33	-	-	-	0,07	0,11	-	0,22	0,34	-	0,16	52,5	99,9
7	7,84	14,86	0,52	0,92	1,19	0,07	0,23	1,98	0,22	0,12	0,81	-	0,96	27,72	58,3

Итак, повышенные содержания урана после проведения скважинного подземного выщелачивания приурочены к глинистым прослоям, обогащенным растительным органическим веществом. Остаточная урановая минерализация развита непосредственно в глинистом цементе.

Таким образом, установлено, что степень извлечения урана зависит от гранулометрического состава рудовмещающих пород и их обогащения углефицированным растительным веществом.

4.2. Выщелачивание урана на месторождениях Зауральского района

На Добровольном месторождении Зауральского района Тургайской партией № 89 в 1989 г. был проведен двухскважинный опыт (Грабовников 1995) продолжительностью 260 суток (с 06.01.1989 г. по 23.09.1989 г.). Опыт проведен на участке, который характеризуется средними параметрами по месторождению. Средняя концентрация кислоты в выщелачивающем растворе колебалась в пределах 20–40 г/л. Снижение pH до 2 установилось на 15 сутки опыта, а окислительно-восстановительный потенциал возрос до +460 мВ. Уран в растворе зафиксирован на 7 сутки опыта. Общая минерализация продуктивного раствора в конце опыта достигла 41 г/л, содержание элементов в растворе составило (г/л): сульфат-иона – 28, натрия – 6, кальция – 0,75, урана – 0,2. Проведенный натурный опыт показал принципиальную возможность добычи урана методом СПВ по сернокислотной схеме (Подземное ..., 1998; Геотехнология ..., 2017; Салтыков, Авдонин, 2017).

В течение последующих 30 лет работы в пределах месторождения не проводились. Начиная с 2020 года на месторождении проводятся доразведочные работы. В рамках этих работ были проведены технологические и минералогические исследования в пределах основной залежи, а также изучение состояния рудовмещающего горизонта на месте проведения двухскважинного опыта, для чего была пробурена контрольная скважина.

По результатам лабораторного статического выщелачивания, проведенного по стандартной методике (Салтыков, Авдонин, 2017), была установлена приуроченность

остаточных содержаний урана к псевдоморфозам пирита по органическому веществу. При длительности опыта 30 суток процент извлечения в различных пробах колеблется от 23 до 100. Максимальные остаточные содержания урана характерны для единичных проб, которые первоначально соответствовали богатым, даже ураганым содержаниям урана – более 1 %.

Пробы с высоким содержанием урана (более 1 %) характеризуются большим количеством органических остатков и обилием различных по размерам и морфологии дисульфидов железа. При изучении остаточных содержаний урана на микрозонде установлено, что основным минералом в кеках выщелачивания является оксид урана, заключенный внутри крупных обособлений пирита (*Рисунок 4.15*, Таблица 4.11). Растворы серной кислоты либо практически совсем не воздействуют на конкреции пирита (*Рисунок 4.15А*), либо фиксируется очень слабое воздействие кислоты, при котором она только частично разрушает края кристаллов пирита (*Рисунок 4.15Б*). В единичном случае встречен минерал обломочного облика с высоким содержанием урана, а также значительным содержанием (%) кремния (2,41 – 4,28), фосфора (1,61 – 2,14) и десятными долями процента – титана, кальция, церия и лантана (*Рисунок 4.16*, Таблица 4.12). Можно предположить, что это обломочный акцессорный минерал – редкоземельно-урановый фосфат. На месторождении Далматовское, которое является эталонным для Зауральского района, остаточные содержания урана в основном связаны с акцессорной урановой минерализацией в титанатах.

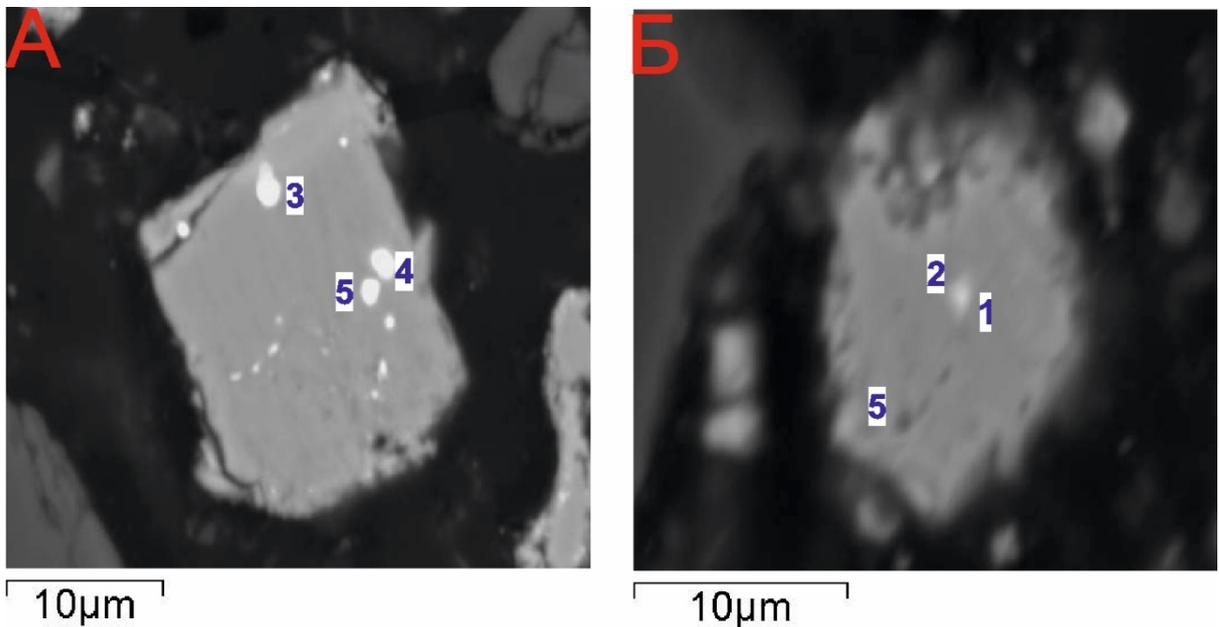


Рисунок 4.15 Остаточная урановая минерализация после лабораторных опытов по выщелачиванию руд Добровольного месторождения (изображения в обратно-рассеянных электронах): А) оксид урана внутри кристалла пирита; Б) оксид урана в конкреции пирита.

Таблица 4.11 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 4.15.

№ сп.		Содержание элементов (мас. %)				
		Si	S	Fe	U	Сумма
А	3	0,20	32,35	27,34	34,97	95,70
	4	0,34	24,00	19,66	47,02	93,53
	5	0,63	26,32	21,24	43,47	92,67
Б	1	0,25	33,96	26,86	26,33	95,33
	2	0,12	44,55	37,88	10,72	99,18
	5	1,43	48,22	37,39	0,95	88,96

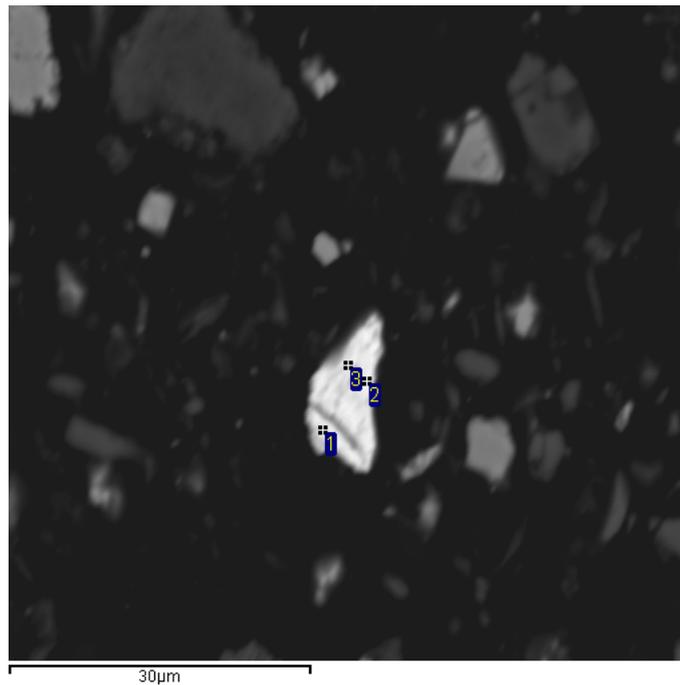


Рисунок 4.16 Обломок уранового фосфата с повышенными содержаниями редких элементов, выявленный в кеке выщелачивания. Месторождение Добровольное. РСМА.

Таблица 4.12 – Результаты микрозондовых анализов, к Рисунок 4.16.

№ сп.	Содержание элементов (мас. %)														
	O	Na	Si	P	S	Zn	Sr	Y	Zr	La	Ce	Hf	W	U	Сумма
1	14,30	0,49	2,41	1,61	0,83	0,23	0,00	0,00	0,00	0,33	0,32	0,09	0,00	47,67	71,54
2	17,05	0,13	2,41	1,88	1,16	0,08	0,74	0,31	0,45	0,51	0,61	0,00	0,21	59,14	88,37
3	15,70	0,31	4,28	2,14	1,53	0,00	1,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	58,78	87,57

В 2020 г. на месте проведения двухскважинного опыта АО «Далур» пробурена контрольная скважина № 224. Рудовмещающие породы в интервале 513,4 – 529,7 м после воздействия кислоты представлены преимущественно темно-серыми, обогащенными углистым растительным детритом терригенными разностями с единичными прослоями белесых и светло-серых разностей. Литологическая колонка с данными элементного и минерального состава приведена на Рисунок 4.17.

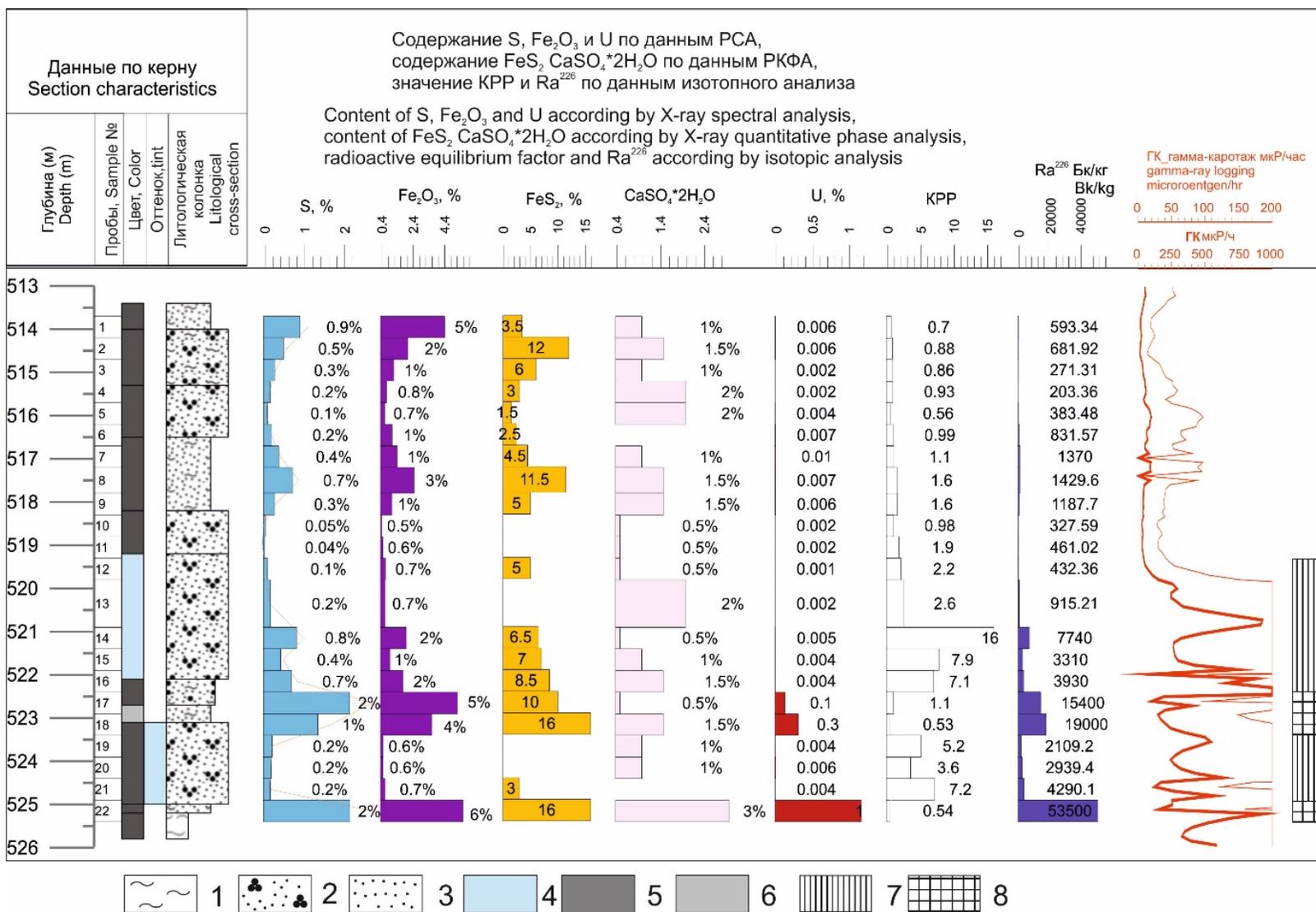


Рисунок 4.17 Литологическая колонка рудовмещающего горизонта на месте проведения двухскважинного опыта ПВ-89. Характеристики изменчивости элементного (S, Fe и U) и минерального (гипс и пирит) состава рудовмещающих пород, радиоизотопные характеристики.

Условные обозначения: 1) глинистые отложения; 2) разномерные пески; 3) мелкозернистые пески; цветовая характеристика пород: 4) беловые; 5) темно-серые; 6) серовые; 7) уровни выщелачивания урана; 8) уровни перетолжения урана.

Содержание урана в породах на месте проведения опыта колеблется по разрезу от 0,002 до 1%, причем в основном преобладают интервалы с содержанием урана в первые тысячные доли процента. В этих же интервалах значения КРР больше 1, что свидетельствует о выщелачивании урана в процессе СПВ. Два интервала с повышенным содержанием урана (522,4–523,4 и 524,9–525,4 м) характеризуются и повышенными значениями радия (15400–53500 Бк/кг), а значения КРР не превышают 0,5. Подобные соотношения КРР и содержания урана характерны для привноса урана, т.е. его переотложения (Радиоизотопные..., 2015).

В выщелоченных породах содержание пирита колеблется от 1 до 16 %, причем его наибольшее количество приурочено к обогащенным ураном разностям. Морфологически пирит представлен только крупными конкрециями и мелкими кристаллами. Мелкие кристаллы пирита распространены по периферии растительных остатков, нередко на границе с гипсом, который выполняет роль цемента песков или импрегнирует каолинит. Образование гипса в количестве от 0,5 до 3 % связано с взаимодействием выщелачивающего раствора с кальцием, содержащимся в полевых шпатах. Гипс и ярозит являются характерными минералами, образующимися в породах после проведения СПВ по сернокислотной схеме (Геотехнология урана, 2017). В проработанных выщелачиванием отложениях отсутствует фрамбоидальный пирит, вероятно, разрушенный сернокислотными растворами.

Образец с радиоактивностью 244 мкР/час и содержанием урана 0,32 % при изучении методами автордиографии при экспозиции 4 суток характеризуется яркой пятнисто-точечной засветкой радиографии, которая совпадает с выделениями крупных стяжений и конкреций пирита (Рисунок 4.18). Штуфы с содержаниями урана от тысячных до первых десятых долей процентов, с радиоактивностью не больше 20 мкР/час при экспозиции 35 суток характеризуются точечной вкрапленностью и вуалевидной засветкой пленки радиографии, которые также совпадают с выделениями дисульфидов железа.

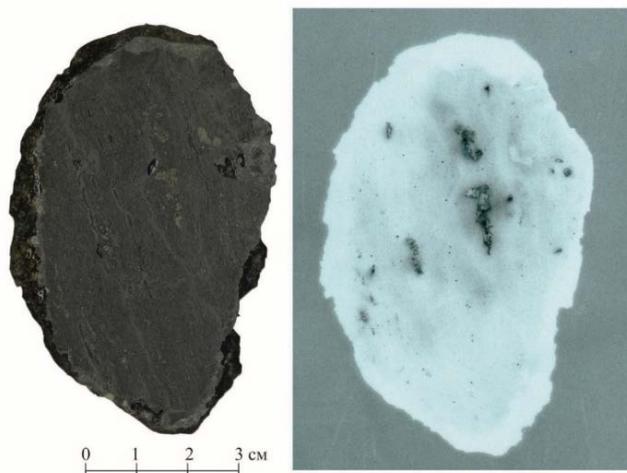


Рисунок 4.18 Характер распределения урана. Приуроченность треков радиоактивности к конкрециям пирита. Фото полированного штуфа и радиография с экспозицией 4 суток. Месторождение Добровольное, участок двухскважинного опыта ПВ-89.

Как хорошо видно на автордиографии, повышенные содержания урана приурочены к крупным конкрециям пирита, а также к их мельчайшим разностям. Мельчайшие разности пирита представлены мелкими кристаллами кубической формы. В шлифах мелкие кристаллы пирита распространены по периферии растительных остатков, нередко на границе с гипсом. Пиритовая конкреция имеет зональное строение: в центре наблюдается полная псевдоморфоза пирита по растительному остатку с сохранением рисунка растительной ткани, к краевым частям постепенно появляются зональные округлые (фрамбоидальные) выделения среди сохранившейся растительной ткани (Рисунок 4.19). Содержание урана, заключенного между конкрециями пирита, составляет приблизительно 58 %, непосредственно в составе пирита уран не фиксируется (Рисунок 4.20, спектр 3, Таблица 4.13). Такое строение пиритовой конкреции, с одной стороны, свидетельствует о последовательном росте пиритовых стяжений, а с другой – о том, что рост пирита сопровождался осаждением урана. Пиритовая конкреция в выщелоченных породах окаймляется «полоской» урановой минерализации, которая по химическому составу аналогична минералу внутри конкреции. Содержание урана в краевой части конкреции достигает 55,46 % (Рисунок 4.20, спектр 4, Таблица 4.13).

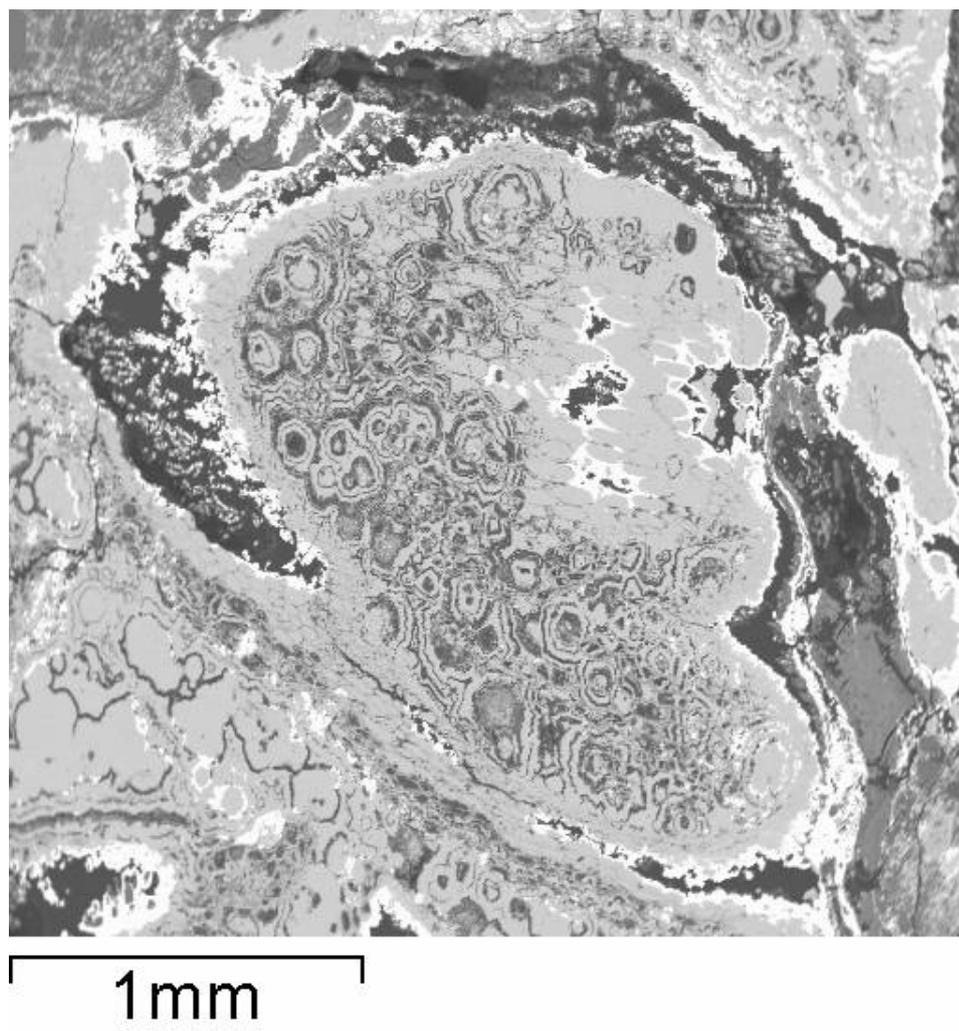


Рисунок 4.19 Пиритовая конкреция с псевдоморфным развитием сульфидов железа по растительному детриту.

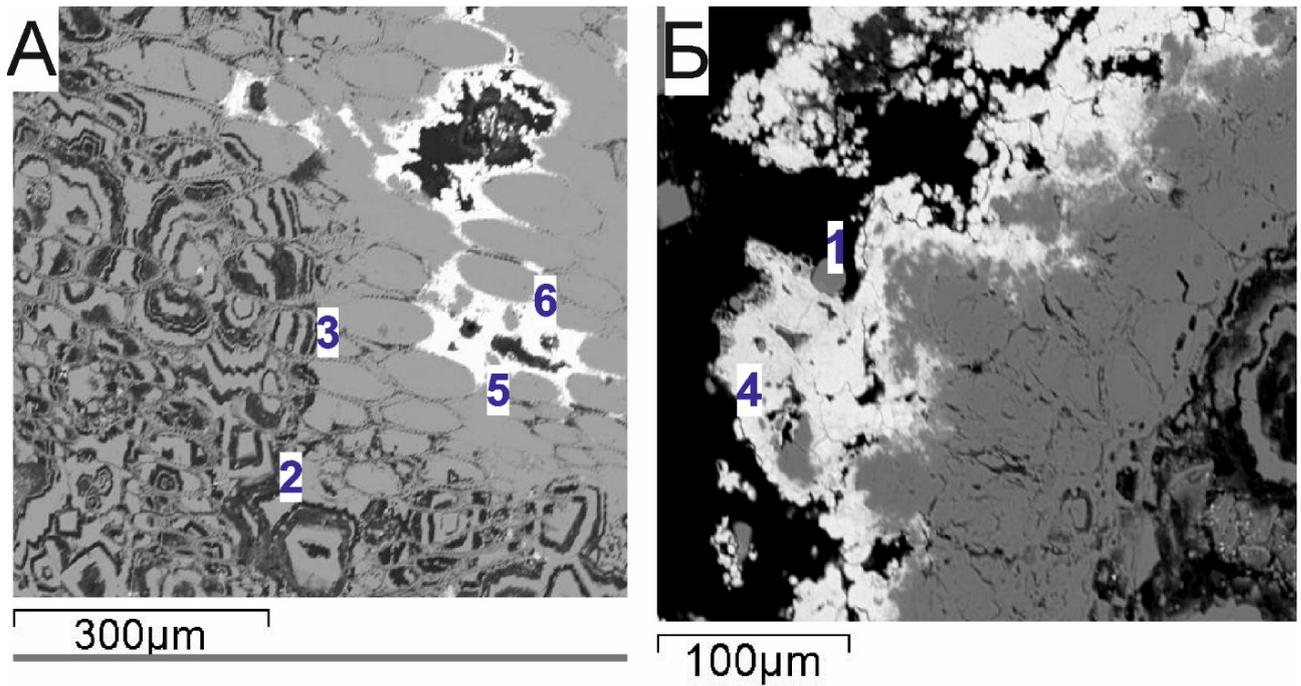


Рисунок 4.20 Характер распределения урана (белое) в конкреции пирита: А – внутренняя часть, Б – краевая часть. Добровольное, участок двухскважинного опыта ПВ-89. Фото в отраженных электронах, РСМА.

Таблица 4.13 – Результаты микрозондовых анализов к Рисунок 4.20.

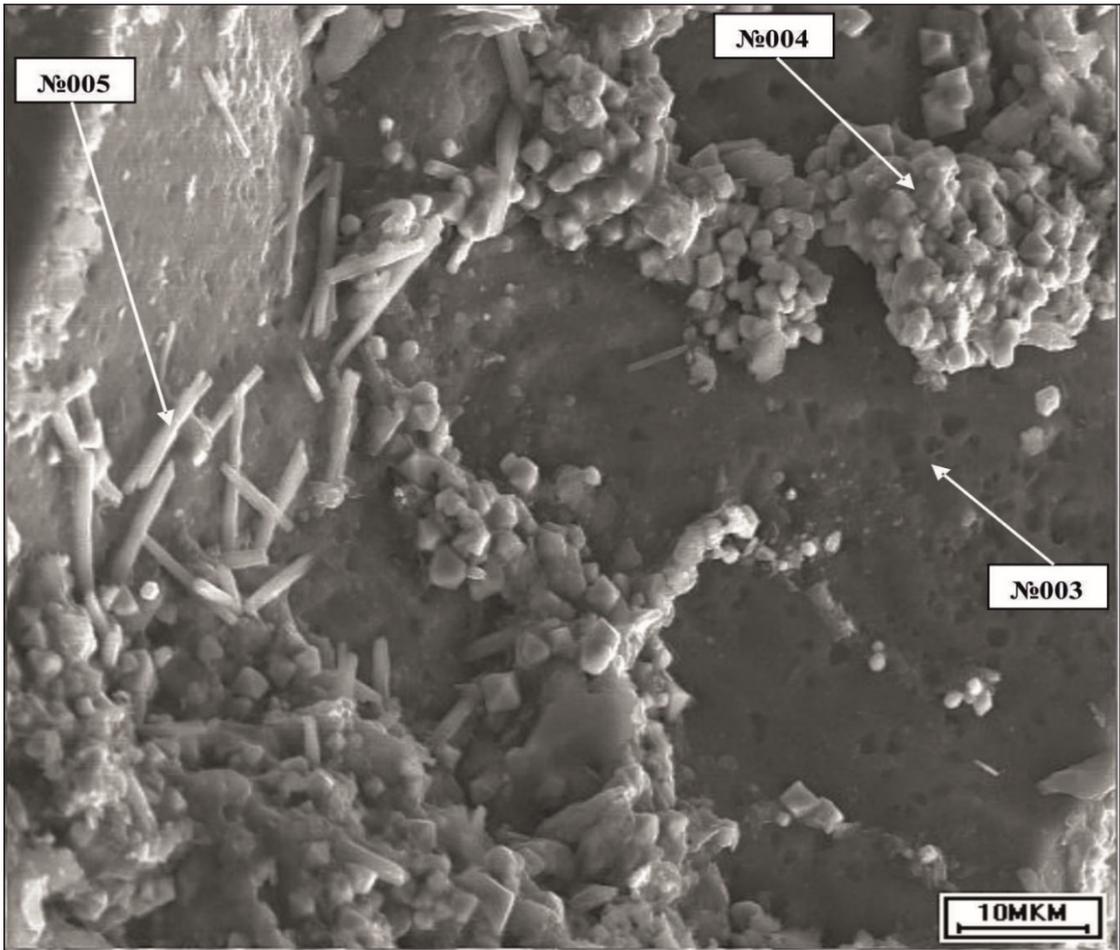
сп.	Содержание элементов (мас. %)												
	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe	U	Сумма
Внутренняя часть псевдоморфозы (Б)													
2	0,00	0,99	0,00	0,86	0,77	0,02	2,02	0,04	0,48	0,06	1,30	0,25	7,35
5	21,61	0,20	0,08	0,85	5,25	2,65	1,12	0,00	1,96	0,13	0,74	57,88	96,49
6	23,79	0,36	0,00	0,50	6,23	2,48	1,29	0,00	1,95	0,00	1,43	58,76	99,60
Спектр	S	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Th	U	Сумма		
3,00	54,97	0,05	43,75	0,58	0,15	0,00	0,25	0,89	0,00	0,00	100,65		
Краевая (В)													
	S	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Th	U	Сумма		
1	53,59	0	43,31	0,58	0,24	0	0,15	0	0	0,34	98,19		
	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe	U	Сумма
4	24,05	0,24	0,08	0,66	6,96	2,54	1,88	0	1,42	0,17	2,61	55,46	97,69

Для установления природы накопления урановой минерализации в краевой части пиритовой конкреции данный образец был изучен на растровом электронном микроскопе. На поверхности корродированных зерен кварца фиксируются столбчатые выделения гипса, которые отсутствовали в исходных породах. В ассоциации с гипсом присутствует тонкий агрегат кубического пирита (Рисунок 4.21). Выявлено многокомпонентное ураносодержащее гелеподобное образование в ассоциации со столбчатым гипсом и мелкими кристаллами пирита

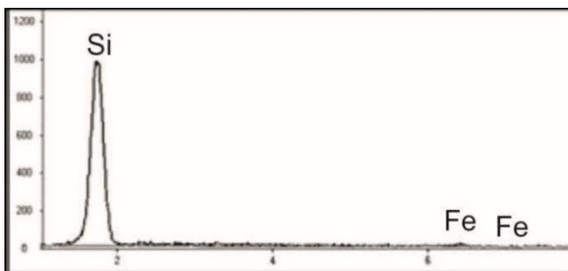
(Рисунок 4.22). Также методами электронной микроскопии диагностирован многокомпонентный урансодержащий гель, который присутствует в виде тонкой пленки с хорошо диагностируемыми трещинами усыхания и развитыми на поверхности пленки мелкими кристаллами пирита (Рисунок 4.23). Учитывая отсутствие гипса в исходных породах, можно предположить, что указанные многокомпонентные гели являются результатом переотложения урана при добыче урана методом СПВ.

Нами установлено, что большое количество растительных остатков и пирита в юрских рудовмещающих отложениях Зауральского района формирует контрастную восстановительную среду. Совместное выпадение урана и пирита на стадии диагенеза и эпигенеза создает трудности при выщелачивании урана методами СПВ. После окончания отработки залежи углефицированный растительный детрит способствует восстановлению техногенного урана на месте добычи.

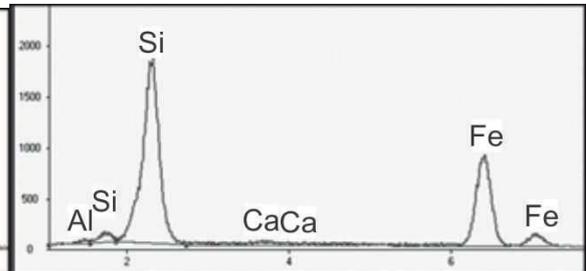
Таким образом, проведенные минералогические исследования рудовмещающих пород после выщелачивания позволяют сформулировать **третье защищаемое положение**. Наличие повышенных содержаний урана – остаточных и переотложенных после отработки руд способом СПВ – обусловлено типом урановой минерализации, литологическим составом рудовмещающих пород, включая растительное органическое вещество и сульфиды металлов.



Спектр 003

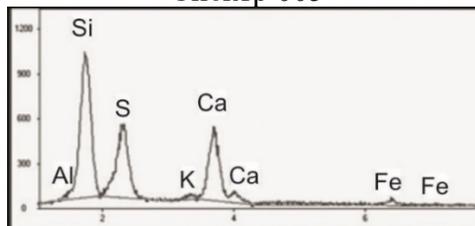


Спектр 004



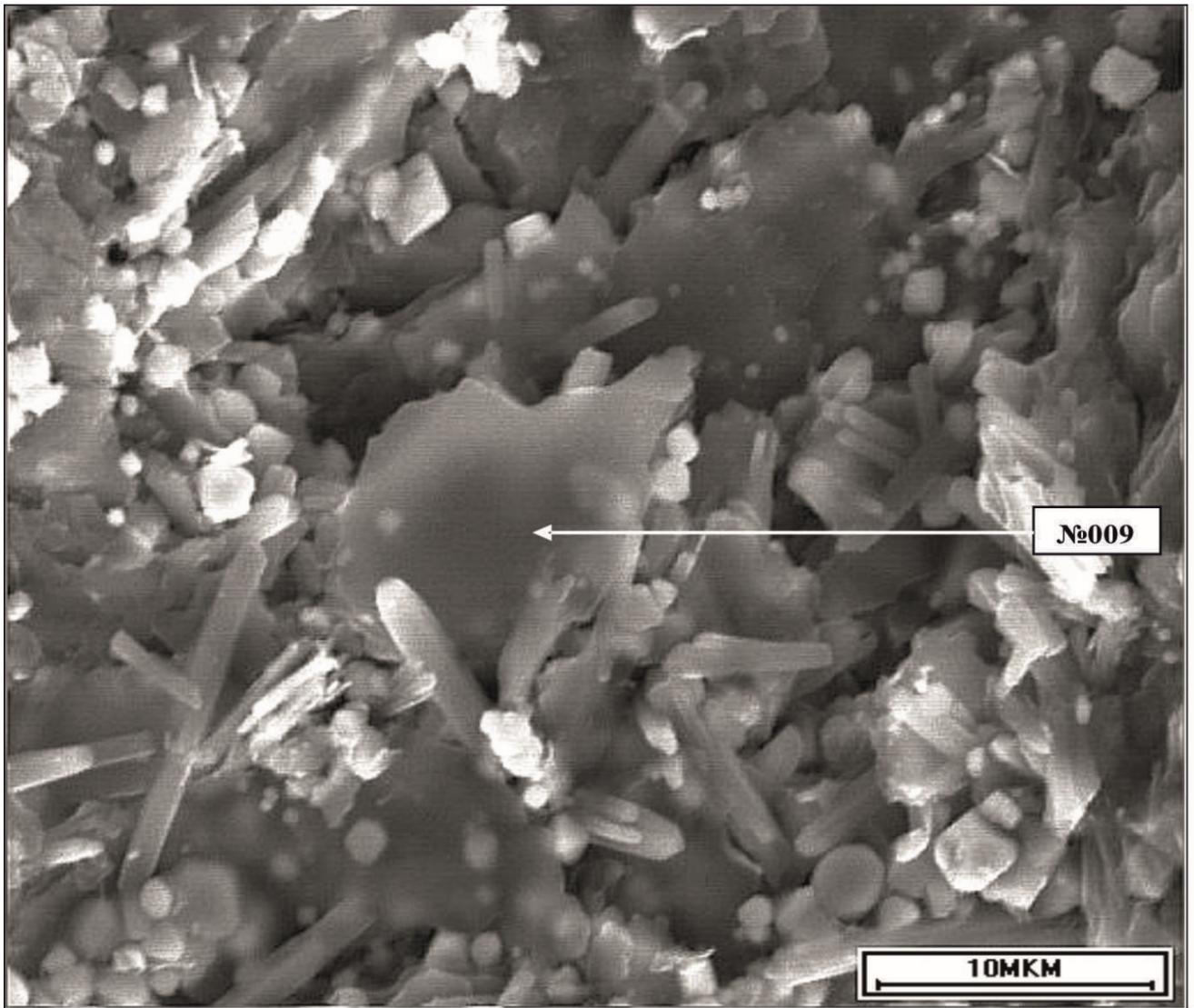
Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3
3,81	1,22	36,68

Спектр 005

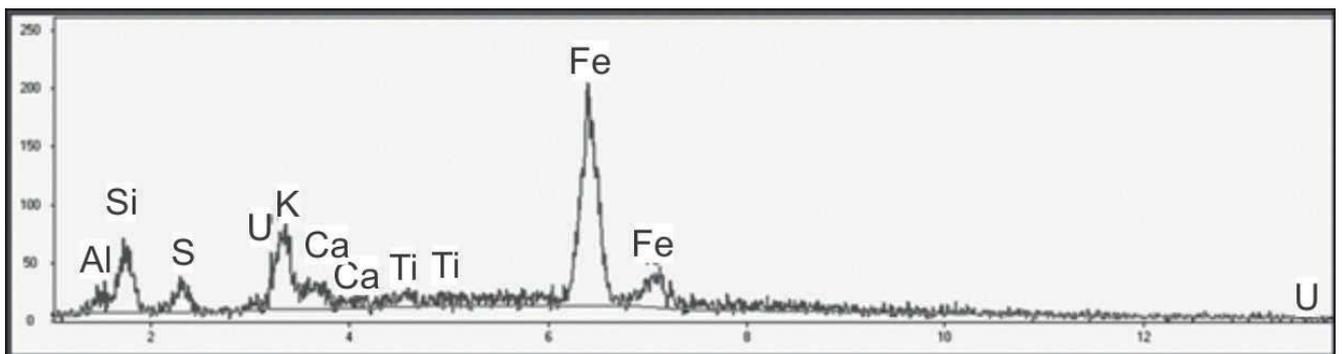


Al_2O_3	SO_3	CaO	Fe_2O_3
0,00	17,52	13,20	2,13

Рисунок 4.21 Отложение на корродированной поверхности кварца (спектр № 003) тонкого агрегата пирита (спектр № 004) и столбчатых выделений гипса (спектр № 005). Добровольное, участок двухскважинного опыта ПВ-89. РЭМ.

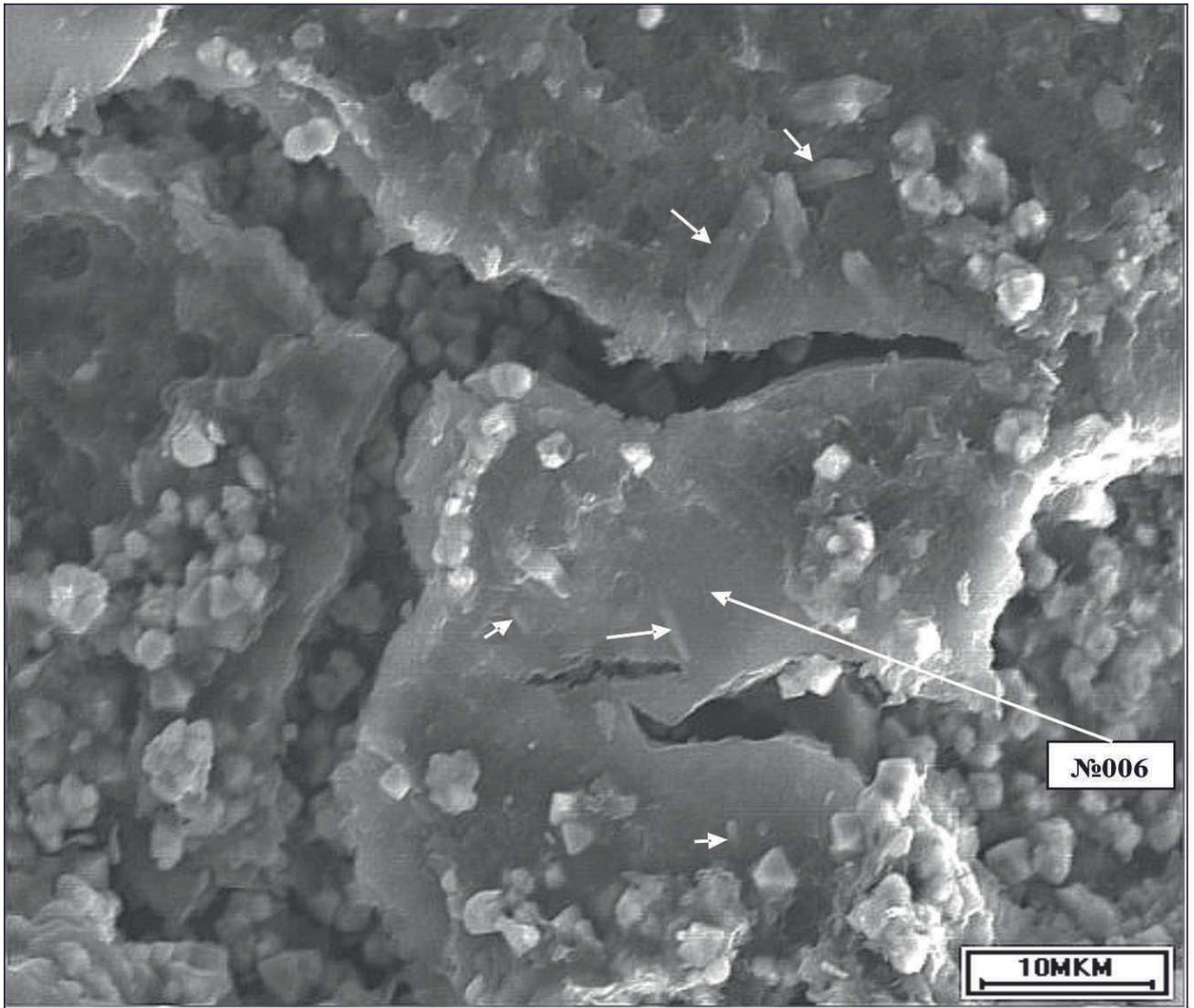


Спектр 009

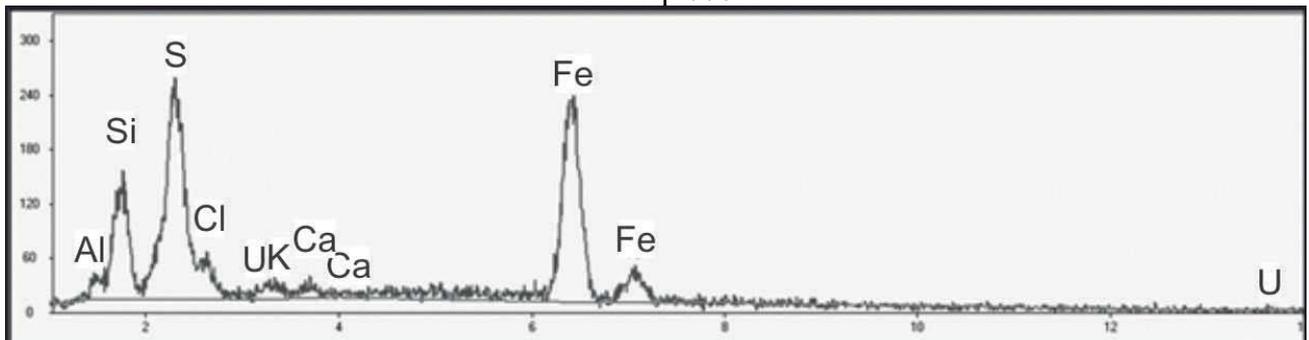


Al_2O_3	SiO_2	CaO	TiO_2	U_2O_3
6,88	30,19	3,17	1,24	0,00

Рисунок 4.22 Многокомпонентное урансодержащее гелеподобное образование, содержащее Al, Si, S, K, Ca, Ti, Fe, U (спектр № 009), ассоциирующее с мелкими шестоватыми кристаллами гипса и октаэдрическими, кубическими, округлыми выделениями пирита. Добровольное, участок двухскважинного опыта ПВ-89. РЭМ



Спектр 006



Al_2O_3	SiO_2	SO_3	CaO	Fe_2O_3	U_2O_5
4,381	32,22	23,51	1,11	31,52	2,39

Рисунок 4.23 Отложение многокомпонентных урансодержащих гелей с отчетливо выраженными трещинами усыхания и следующим элементным составом: Al, Si, S, Cl, K, Ca, Fe, U (спектр № 006).

На поверхности гелей широким распространением пользуются мелкие кристаллы пирита и столбчатые выделения гипса (нередко зародыши) (отмечено стрелками). Добровольное, участок двухскважинного опыта ПВ-89. РЭМ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ особенностей формирования уранового оруденения на месторождениях базальных палеодолин Витимского и Зауральского районов с привлечением информации по Витимо-Каренгскому показал, что основными факторами, необходимыми для образования подобных объектов, являются: приуроченность территорий к складчатым областям; проявленность интенсивных периодов тектоно-магматической активизации; внедрение пород, геохимически специализированных на уран; период тектонического спокойствия с переводом урана в подвижную форму.

2. В работе обоснована роль гумидного климата в накоплении и изменении растительности, обуславливающей наличие контрастного геохимического барьера. Преобразование растительного детрита происходит в результате деятельности бактериальных сообществ. Различие в типах растительности – хвойная в отложениях Зауральского района и широколиственная в Витимском – приводит к накоплению разнообразных форм урановой минерализации (оксидной или фосфатной).

3. Сравнение условий локализаций урановых руд изученных объектов позволило уточнить ведущие факторы рудогенеза палеодолинных месторождений. К ним отнесены однонаправленность и установленная непрерывная последовательность степени преобразования рудовмещающих пород и собственно рудообразующего процесса. Она преимущественно связана с климатическими особенностями региона. Так, существование гумидного климата характерно для ранней стадии накопления рудовмещающих отложений, а дальнейшие преобразования могут происходить как при гумидном, так и при аридном.

4. Установлена эволюция урановых концентраций на гидрогенных месторождениях, заключающаяся в постепенном переходе от сорбционных накоплений на стадии седиментогенеза к гелеподобным в диагенетических условиях, а затем к минеральным и кристаллическим формам в период эпигенеза. Все это сопровождается жизнедеятельностью определенных бактериальных сообществ – аэробных на стадии седиментогенеза и раннего диагенеза, которые затем сменяются анаэробными, преимущественно сульфатредуцирующими формами. Они являются активными участниками в формировании и изменении геохимических свойств среды.

5. Впервые на основании установленных закономерностей преобразования форм урана и сопутствующих элементов (фосфора, алюминия кремния, железа и серы) выделены семь (VII) стадий их последовательного изменения. Одновременно с трансформацией накоплений урана эволюционирует и растительное органическое вещество от практически первичного детрита до углистых остатков буроугольной стадии. По мере нарастания стадийных преобразований происходит постепенное увеличение содержаний элементов в пределах растительного

органического вещества (в %): серы и железа с 3 до 30, урана с 10 до 20, фосфора и кальция от 2 до 6–7.

На заключительной эпигенетической стадии формируется промышленное оруденение, которое может отрабатываться высокоэффективным методом скважинного подземного выщелачивания.

6. Нами выявлены основные причины неполного извлечения урана в процессе добычи способом СПВ. На месторождениях Витимского района (Хиагдинское) повышенные содержания урана в основном связаны с остаточными содержаниями, распространенными в глинистом цементе. Неизвлекаемый уран представлен плохо раскристаллизованными гелеподобными образованиями дисперсной размерности. На месторождениях Зауральского района (Добровольное) повышенные содержания урана после выщелачивания в большей степени обусловлены процессами переотложения. Техногенный уран приурочен преимущественно к краевым частям сульфидов железа и представлен поликомпонентными гелями кремний-алюминиевого состава, на поверхности которых выпадают кристаллы гипса и мелкого пирита, отсутствующие в природных рудах.

7. Следовательно, повышенное содержание глинистых компонентов, растительного органического вещества, сульфидов железа в рудовмещающих отложениях негативно сказывается на извлечении полезного компонента, приводя к формированию как остаточных, так и переотложенных концентраций. Наличие переотложенного урана определяется развитием техногенного геохимического барьера.

Таким образом, эволюция соединений урана происходит последовательно и непрерывно на всех стадиях литогенеза с формированием не только его минеральных форм, но и в сочетании с другими элементами (Al, Si, Fe, S, P), создавая предпосылки к преобразованию вещества от сорбции к гелям, а затем к минеральным формам.

8. В конечном итоге формирование урановорудных залежей в разнообразных литолого-геохимических, фациальных условиях на различных стадиях литогенеза позволяет прогнозировать наличие остаточных концентраций урана при проведении СПВ. Для вовлечения остаточных концентраций в добычу необходимы дополнительные исследования на каждом конкретном объекте, с последующей модификацией продуктивного выщелачивающего раствора. Таким образом, проведенные исследования позволят более эффективно проводить отработку руд данного типа.

Список принятых в работе сокращений

ВИМС	– Всероссийский институт минерального сырья
ВСЕГЕИ	– Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского
ГРР	Геологоразведочные работы
ИГЕМ	– Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук
МАГАТЭ	– Международное агентство по атомной энергии
МДК	– Микро-дифракционная картина
МСБ	– Минерально-сырьевая база
ОВ	– органическое вещество
РЗМ	– редкоземельные металлы
РОВ	– растительное органическое вещество
СПВ	– скважинное подземное выщелачивание
УРО	– углефицированная растительная органика
УРР	– урановорудный район

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтгаузен М.Н. Причины возникновения эпохи накопления редких металлов и фосфора в морских осадках нижнего палеозоя. М.: Госгеолтехиздат, 1956. 16 с.
2. Аренс В.Ж. Физико-химическая геотехнология. – М.: Изд-во «Горная книга», 2021. – 816 с.
3. Авдонин Г.И., Колпакова Е.В., Миронов Б.А. Изменение пород и руд в процессе подземного выщелачивания урана на примере залежи № 28 месторождения Учкудук / Специальные вопросы атомной науки и техники. Серия: Геология и горное дело. Выпуск №2. – 1986. – С. 14-30.
4. Бастриков Ю.Л., Печенкин И.Г. Путь к отечественному урану (к истории геологоразведочных работ на уран) // АНРИ. № 2 (85). 2016. С.65–71.
5. Бахур А.Е., Гулынин А.В., Стародубов А.В. Одновременное определение ^{238}U , ^{226}Ra и коэффициента радиоактивного равновесия в урановых рудах методом инструментальной гамма-спектрометрии // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 12. – С. 60–63.
6. Белова Л.Н., Дойникова О.А. Условия образования урановых минералов в зоне окисления урановых месторождений // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45. № 2. С. 148-151.
7. Биостратиграфия и условия накопления средне- и верхнемиоценовой вулканогенно-осадочной толщи джилиндинской впадины Западного Забайкалья / Черняева Г.П., Лямина Н.А., Рассказов С.В., Резанов И.Н., Савинова В.В. // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 4. С. 460-471.
8. Бойцов В.Е., Верчеба А.А. Геолого-промышленные типы месторождений урана. М.: КДУ, 2008.
9. Бойцов А.В. Развитие мировой урановой промышленности – ключевые вызовы // Разведка и охрана недр – 2022, № 08. – С. 3-10.
10. Викентьев И.В., Кайлачаков П.Э. Уникальное месторождение рения в угленосных песках карбона Русской плиты. Сообщение 1. Геологическое строение // Литология и полезные ископаемые. – 2020. – № 3. – С. 209–226.
11. Виниченко П.В. Теория биогенного рудообразования на примере урановых месторождений. Иркутск: Сосновгеология. 2004. 215 с.
12. Витимский урановорудный район / Самович Д.А., Дзядок С.А., Митрофанов Е.А., Вылков С.П., Федин А.Ю., Тирских С.С. г. Иркутск, 2015. – 101 с.
13. Винокуров С.Ф., Магазина Л.О., Стрелкова Е.А. Редкоземельные и редкие элементы в урановых рудах палеодолинных месторождений Витимского района: характер распределения,

форма нахождения, генетическое и практическое значение // Геология рудных месторождений – 2017, – 2. – С. 141–162.

14. Войткевич Г.В. Роль органического вещества в концентрации металлов в земной коре / Г.В. Войткевич, Л.Я. Кизильштейн, Ю.И. Холодков. М., Недра, 1983. – 160 с.

15. Вольфсон Ф.И., К.Г. Королев Условия формирования урановых месторождений. М.: Недра, 1990. – 288 с.

16. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. – М.: Мир, 1968. – 367 с.

17. Геотехнология урана (российский опыт): монография / Под ред. И.Н. Солодова. Е.Н. Камнева. – М.: «КДУ», Университетская книга, 2017, – 576 с.

18. Геолого-промышленные типы урановых месторождений стран СНГ – М.: ВИМС, 2008. 72 с.

19. Геохимические особенности рудовмещающей среды на месторождениях урана Хиагдинского рудного поля / Б.Т. Кочкин, И.Н. Солодов, Н.И. Ганина, М.Л. Рекун, Н.Н. Тарасов, Г.А. Шугина, Л.С. Шулик // Геология рудных месторождений – 2017, том 59. – № 5. – С. 349-362.

20. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист N-50 – Сретенск. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 377 с.

21. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист N-49 – Чита. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. 604 с.

22. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист N-41 – Челябинск. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. 416 с.

23. Гидрогенные месторождения урана (основы теории рудообразования) / Под. Ред. А.И. Перельмана. – М.: Атомиздат, 1980 – 256с.

24. Грабовников В.А. Геотехнологические исследования при разведке металлов. Москва: Недра. 1995. 155 с.

25. Данчев В.И., Стрелянов Н.П., Шиловский П.П. Образование экзогенных месторождений урана и методы их изучения. Атомиздат, 1966.

26. Добыча урана подземным выщелачиванием в криолитозоне / Под ред. И.Н. Солодова – М.: ZetaPrint, 2022 – 183 с.

27. Дойникова О.А., Солодов И.Н., Черток М.Б. / Минеральный состав урановых руд месторождения Далматовское (Россия) // Геология рудных месторождений – 2009, том 51. – 06. – С. 540-549.

28. Дойникова О.А. Минералогия урана восстановительной зоны гипергенеза (по данным электронной микроскопии). – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 216 с.
29. Дойникова О.А. Фосфатный состав урановых черней как показатель их биогенного генезиса // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка – 2016, № 5. – С. 18-25.
30. Дойникова О.А., Н.Н. Тарасов, П.М. Карташов Урановая минерализация палеодолинных месторождений Витима // Разведка и охрана недр – 2018, № 12. – С. 24-30.
31. Дойникова О.А., Петров В.А. Рудоформирующий биогенный фактор образования месторождений урана песчаникового типа // Геология рудных месторождений – 2022, том 64. – № 4. – С. 406-420.
32. Домаренко В.А., Краморенко С.В., Мартыненко В.Г., Новгородцев А.А., Руденко А.А., Митрофанов Е.А., Деревенец Е.Г. Радиоактивное равновесие в рудах месторождения Дыбрын (республика Бурятия)
33. Живов В.Л., Бойцов А.В., Шумилин М.В. Уран: геология, добыча, экономика. М.: ОАО "Атомредметзолото", 2012. 304 с.
34. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах. Научное издание. М.М. Астафьева, Л.М. Герасименко, А.Р. Гептнер и др. / – М.: ПИН РАН, 2011. – 172 с.
35. Использование сульфатредуцирующей микрофлоры при очистке остаточных сернокислотных растворов ПВ на пластово-инфильтрационных урановых месторождений / Г.А. Шугина, К.Г. Бровин, Е.М. Шмариович, В.Т. Дубинчук, Р.И. Гольдштейн, Б.И. Натальченко // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – М.: ВИМС. – 1990. – № 125. – С. 123–135.
36. Кайнозойские отложения, геоморфология, геология и сейсмичность зоны БАМ Ендрихинский А.С., Осадчий С.С., Агафонов Б.П., Кульчицкий А.А., Рассказов С.В. Изд. Наука, Сибирское отд, Новосибирск, 1983.
37. Кондратьева И.А., Боброва Л.Л. Геологическое строение и особенности рудогенеза месторождения Семизбай. Минеральное сырье. Серия методическая, № 11. М.: ВИМС, 2011, 44 с.
38. Кондратьева И.А., Печенкин И.Г., Гаврюшов А.В. Условия формирования инфильтрационных месторождений урана и гидрогеохимические методы их изучения. М.: ВИМС, 2011. 77 с.
39. Коченов А.В., Расулова С.Д. Об условиях мобилизации и накопления урана при современном осадкообразовании // Поведение радиоактивных элементов в геологических процессах. М.: Недра, 1978. С 12–22.

40. Коченов А.В., Халдей А.В. К вопросу об источниках урана в экзогенных эпигенетических месторождениях // Литология и полезные ископаемые. 1997. № 4. С. 371-378.
41. Кисляков Я.М., Урманова А.М., Шугина Г.А. Соотношение термоаналитических свойств углистого вещества и микробиологических сообществ на экзогенно-эпигенетических урановых месторождениях // Накопление и преобразование органического вещества современных и ископаемых осадков. – М.: Наука, 1990 (б).. – С 162-181.
42. Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н. Гидрогенное рудообразование. – М.: ЗАО «Геоинформак», 2000. – 608 с.
43. Криолитогенез как механизм уранового накопления в осадочных породах / Карпунин А.М., Миронов Ю.Б, Бузовкин С.В. // Материалы по геологии урана, редких и редкоземельных металлов – М., 2011. – Вып.157. С 25-32.
44. Критерии прогнозирования уранового оруденения в чехле Русской платформы / Г.В. Грушевой, Н.М. Радюкевич, Т.А. Иванова, С.И. Долбилин, В.В. Красных, А.А. Разговоров, В.Т. Рябухин // Региональная геология и металлогения. № 8. 1999. С. 12–34.
45. Кузькин В.И., Минеева И.Г., Печенкин И.Г. Эксплуатация месторождений как фактор роста разведанных запасов / Проблемы геологии и разведки месторождений полезных ископаемых. Материалы геологической конференции, посвященной 75-летию со дня основания кафедры разведочного дела и специальности «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых». Томск: Изд-во ТПУ, 2005, стр. 279-283.
46. Лаверов Н.П., Лисицин А.К., Солодов И.Н. Урансодержащие полиэлементные экзогенные эпигенетические месторождения: условия образования и источники металлов, извлекаемых методами подземного выщелачивания // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42. №1. С. 5–24.
47. Логачев Н.А., Флоренсов Н.А. Байкальская система рифтовых долин в сб. «Байкальский рифт» Изд. Наука, Москва 1968 г. Климат во время формирования КВ.
48. Логвиненко Н.В., Орлова Л.В. Образование и изменение осадочных пород на континенте и в океане. – Л.: Недра, 1987. – 237с.
49. Литогеодинимика и минерогения осадочных бассейнов/ Е.А. Басков, Г.А. Беленицкая, С.И. Романовский и др.; Под ред. А.Д. Щеглова. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1998. – 480 с.
50. Лисицин А.К. Гидрогеохимия рудообразования (на примере экзогенных эпигенетических урановых руд). Москва. Недра. 1975 г. – 248 с.
51. Максимова М.Ф., Шмариович Е.М. Пластово-инфильтрационное рудообразование. М.: Недра, 1993. 160 с.
52. Макаров М.И. Фосфор органического вещества. – Москва: ГЕОС, 2009. – 397 с.

53. Малышев В.И. Радиоактивные и радиогенные изотопы при поисках месторождений урана. – М.: Энергоиздат, 1981. 159 с.
54. Манская С.М., Дроздова Т.В. Геохимия органического вещества. – Москва: Издательство «Наука», 1964. – 315 с.
55. Миронов Ю.Б., Лебедева Г.Б., Пуговкин А.А. Поверхностные урановые месторождения гумидной климатической зоны земли//Региональная геология и металлогения – №63, 2015. С 68 – 76.
56. Морфологические особенности рудных тел и генезис месторождений урана Хиагдинского рудного поля / Кочкин Б.Т., Новгородцев А.А., Тарасов Н.Н., Мартыненко В.Г. // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56. № 6. С. 539–555.
57. Находка U – Fe – Zr – Ti – S – Р-геля в экзогенно-эпигенетическом урановом месторождении Хохловское (Южное Зауралье) / Дымков Ю.М., Дойникова О.А., Волков Н.И. // Геохимия. 2003. № 11. С. 62-67.
58. Некрасова З.А. К вопросу о генезисе уранового оруденения в углях // Вопросы геологии урана. – М.: Атомиздат, 1957. – С. 37-54.
59. Никитина Е.С., Прохоров Д.А. Геологическое строение уранового месторождения Намару и минералого-геохимические особенности руд и рудовмещающих пород (Витимский ураново-рудный район) // Известия вузов. Геология и разведка. 2012а. – №. 4. С 26 – 31.
60. Никитина Е.С., Прохоров Д.А. Закономерности локализации оруденения, минеральный состав руд и рудовмещающих пород уранового месторождения Кореткондинское (Витимский ураново-рудный район) // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2012б. – №. 6. С 44 – 51.
61. Новый геолого-промышленный тип гидрогенных месторождений рения / Карась С.А., Кременецкий А.А., Орлов С.Ю., Культин Ю.В., Шлычкова Т.Б. // Разведка и охрана недр. – 2017. – 8. – С. 20-27.
62. Окислительные преобразования углистого вещества инфильтрационных месторождений / Кисляков Я.М., Урманова А.М., Успенский В.А. и др // Геология рудных месторождений. – 1990 (а). – № 6. – С 56-70.
63. Оношко И.С. Ураноносность битумов // Радиоактивные элементы в горных породах. – Новосибирск: Наука. 1972. – С.55.
64. Органическое вещество в процессе концентрации урана при древнем пластовом окислении угленосных отложений / Круглова В.Г., Успенский В.А., Дементьев П.К., Коченов А.В // Литология и полезные ископаемые. – 1984. № 4. – С. 124-130.
65. Основные направления геологоразведочных работ на уран / Машковцев Г.А., Гребенкин Н.А., Петрин А.В., Прохоров Д.А. // Разведка и охрана недр – 2022, № 08. – С. 22-34.

66. Особенности минерального состава и условий формирования руд Вершинного месторождений / Тарханова Г.А., Дубинчук В.Т., Чистякова Н.И., Никитина Е.С., Прохоров Д.А., Нечелюстов Г.Н., Ружицкий В.В. // Разведка и охрана недр. – 2014. – 06. – С. 7-13.
67. Папулов Г.Н. Верхнеюрские континентальные отложения Восточного склона Урала. // Известия Академии Наук СССР. Серия геологическая. – 1965. – № 9. – С. 96–106.
68. Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов (зона гипергенеза). М.: Недра, 1968. 331 с.
69. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 288 с.
70. Перельман А.И. Биокостные системы Земли. М.: Наука, 1977. 160 с.
71. Печенкин И.Г. У истоков создания теории пластово-инфильтрационного уранового рудообразования // Наука и технологические разработки. – 2012. – Т.91. – 04. – С. 31-43.
72. Печенкин И.Г., Кондратьева И.А. Условия формирования инфильтрационных месторождений. Минеральное сырье. Серия методическая, № 12. М.: ВИМС, 2013. 60 с.
73. Печенкин И.Г. Методология и результаты регионального прогноза крупных гидрогенных урановых месторождений в малоизученных регионах // Разведка и охрана недр. – 2023. – 08. – С. 39-50.
74. Пешков П.А., Суматов Ю.М., Шумилин М.В. Молодой уран России // Разведка и охрана недр. – 2015. – 10. – С. 24-28.
75. Поведение изотопных ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) систем при формировании месторождений урана «песчаникового» типа // В.Н. Голубев, Е.О. Дубинина, академик РАН И.В. Чернышев, Т.А. Иконникова // Доклады Академии Наук– 2016, –Т.466. – № 1. – С. 64–67.
76. Поверхностные» месторождения – новое направление развития минерально-сырьевой базы урана России / Петров О.В., Миронов Ю.Б., Лебедева Г.Б., Пуговкин А.А., Шатов В.В. // Разведка и охрана недр. – 2015. – 10. – С. 75–82.
77. Подземное выщелачивание полиэлементных руд / Н.П. Лаверов, И.Г. Абдульманов, К.Г. Бровин и др.; Под ред. Н.П. Лаверова. – М.: Издательство Академии горных наук, 1998. – 446 стр.
78. Полигенность и полихронность урановой минерализации на месторождениях Хиагдинского рудного поля (Бурятия) / Б.Т. Кочкин, Н.Н. Тарасов, О.В. Андреева, Эн.Э. Асадулин, В.Н. Голубев // Геология рудных месторождений – 2017, том 59. – № 2. – С. 124-140.
79. Положительные аномалии содержания урана в торфяниках гумидной зоны (обзор) // Ю.Н. Водяницкий, Н.А. Гребенкин, Д.В. Манахов, А.В. Сащенко, В.М. Тюленева / Почвоведение – 2019, – 12. – С. 1492–1501.
80. Пострудные процессы миграции урана в месторождениях «песчаникового» типа: $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ и U-Pb-изотопная систематика руд месторождения Намару, Витимский район,

Северное Забайкалье // В.Н. Голубев, Н.Н. Тарасов, И.В. Чернышев, А.В. Чугаев, Г.В. Очирова, Б.Т. Кочкин // Геология рудных месторождений– 2021, –Т.63. – № 4. – С. 297–310.

81. Прогноз, поиски, разведка и промышленная оценка месторождений урана для отработки подземным выщелачиванием / К.Г. Бровин, В.А. Грабовников, М.В. Шумилин, В.Г. Языков. – Алматы: Гылым, 1997. – 384 с.

82. Радиографические методы при решении прикладных задач геологии и радиоэкологии. Малышев В.И., Л.А. Березина, А.Е. Бахур, Т.М. Овсянникова / «Минеральное сырье». Серия методическая, № 18. М.: ВИМС, 2017. С.173.

83. Радиоизотопные методы при поисках и оценке инфильтрационных месторождений урана в Южном Казахстане / А.Е. Бахур, Т.М. Овсянникова, Л.И. Мануилова, Е.В. Альперович-Ландо, С.А. Сяткин, В.Г. Карелин, И.А. Шишков // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – М.: ВИМС, 2015. – № 159. – С. 363–377.

84. Рассказов С.В., Лямина Н.А., Черняева Г.П. Стратиграфия кайнозоя Витимского плоскогорья: Феномен длительного рифтогенеза на юге Восточной Сибири. Институт земной коры СО РАН. – Новосибирск: Академическое из-во «Гео», 2007. – 193 с.

85. Расулова С. Д. Экспериментальное изучение процесса концентрации урана в торфяниках // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов / Сборник КНТС. Вып. 19. М.: ВИМС, 1971. С. 110–112.

86. 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.

87. Рудоконтролирующая эпигенетическая зональность и вещественный состав руд на Хохловском месторождении урана / Коноплев А.Д., Марков С.Н., Долбинин С.И., Ладейщиков А.В., Попонина Г.Ю. // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов / Сборник КНТС. Вып. 144. М.: ВИМС, 2002. С. 113–122.

88. Салай А. (Венгрия) Роль гумусовых кислот в геохимии урана и их возможная роль в геохимии других катионов / Химия земной коры. Труды Геохимической конференции, посвященной столетию со дня рождения академика В.И. Вернадского. Том II. Издательство «Наука». Москва, 1964 г. Стр. 428–441.

89. Салтыков А.С., Авдонин Г.И. Применение натуральных геотехнологических исследований на месторождениях урана различных геолого-промышленных типов Разведка и охрана недр. – 2017. –№ 12. – С. 34-42.

90. Салтыков А.С., Кутуева О.В., Авдонин Г.И. Натурные геотехнологические исследования на стадии «оценочные работы» Разведка и охрана недр. – 2018. –№ 7. – С. 44-51.

91. Самоочищение продуктивного горизонта на месте проведения двухскважинного опыта по выщелачиванию урана на Добровольном месторождении (Курганская область) / Сащенко А.В., Авдонин Г.И., Тарханова Г.А., Носков М.Д. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. – № 5 Стр. 137-147.
92. Сащенко А.В., Стародубов А.В., Киселев А.А. Особенности формирования современных месторождений урана в почвенно-торфяных месторождениях в Забайкалье // Сборник материалов VII Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием. Москва, ИГЕМ РАН, 2018. Стр. 309.
93. Сащенко А.В., Тарханова Г.А., Тюленева В.М. Роль гумифицированного и углистого растительного вещества в рудоносных песчаных отложениях месторождений урана палеодолинного типа // Разведка и охрана недр. 2022. – № 7 стр. 16-24.
94. Сидоренко Г.А. Кристаллохимия минералов урана. М., Атомиздат, 1978. С.216
95. Солодов И.Н., Шугина Г.А., Зеленова О.И. Техногенные геохимические барьеры в рудоносных горизонтах гидрогенных месторождений урана // Геохимия. – 1994. – 3. – С. 415-432.
96. Солодов И.Н., Кочкин Б.Т. Влияние геоструктурных и геохимических факторов на распространение техногенных сернокислых рассолов в водоносном горизонте, вмещающем урановую залежь месторождения Букиной (Кызылкумы) // Геология рудных месторождений. – 1996. – том 38, № 1 – С. 87-102.
97. Солодов И.Н., Нестерова М.В. Углекислые подземные воды – рудосохраняющий фактор на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля (Республика Бурятия) // Геология рудных месторождений. – 2022. – том 64, № 1 – С. 151-162.
98. Сравнение геохимических особенностей рудоносных горизонтов на молодых и древних гидрогенных месторождениях урана (геотехнологические аспекты) / И.Н. Солодов, М.Б. Черток, Н.И. Ганина, Л.С. Шулик // Геология рудных месторождений. – 2006. – том 48, № 1. – С. 71-85.
99. Становление и основные результаты деятельности отечественной урановой геологии / Машковцев Г.А., Печенкин И.Г., Щеточкин В.Н., Луговская И.Г., Лихникевич Е.Г., Ожогина Е.Г. // Разведка и охрана недр – 2023, № 08. – С. 3-9.
100. Столяров А.С., Ивлева Е.И. Ергенинский ураново-редкометалльный район Калмыкии. Минеральное сырье, № 19. – М.: ВИМС, 2008. 170 с.
101. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. Том 1. Типы литогенеза и их размещение на поверхности Земли. г. Москва Из-во АН СССР, 1960.
102. Тарханов А.В., Бугриева Е.П. Крупнейшие урановые месторождения мира. М.: ВИМС, 2012, 118 с.

103. Тарханов А.В., Бугриева Е.П. Поверхностные урановые месторождений пустынных равнин. «Минеральное сырьё». Серия методическая, № 15. М.: ВИМС, 2015, 57 с.
104. Тарханова Г.А., Прохоров Д.А. Генетические особенности формирования уранового оруденения «витимского» типа // Разведка и охрана недр. – 2017. – 11. – С. 47-59.
105. Техногенные геохимические барьеры / А.И. Перельман, Е.Н. Борисенко, Н.Ф. Мырлян, М.П. Тентюков Геохимия техногенных процессов. – М.: Наука, 1990. – 176с.
106. Умова Л.А., Шатров В.П. Континентальные юрские и меловые отложения Южного Зауралья / Континентальные отложения позднего мезозоя Урала и Зауралья. Сборник по вопросам стратиграфии № 11. Свердловск, 1968. С 5–31.
107. Уникальное месторождение рения в угленосных песках карбона Русской плиты. Сообщение 2. Минералогия руд / Кайлачаков П.Э., Дойникова О.А., Белоусов П.Е., Викентьев И.В. // Литология и полезные ископаемые. – 2020. – № 4. – С. 337–370.
108. Уран / Под. М.И. Фазлуллина. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2005. – 255с.
109. Уран Российских недр /под ред. Г.А. Машковцева. М.: ВИМС, 2010.
110. Урановой геологии ВИМСа – 70 лет / Г.А. Машковцев (главный редактор), И.Г. Печенкин, А.А. Рогожин, В.Н. Щеточкин и др.; ФГУП «ВИМС». – М.: РИС ВИМС, 2013 – 160.
111. Урановые месторождения Хиагдинского рудного поля, Бурятия: Условия образования и факторы рудоконтроля / Тарасов Н.Н., Кочкин Б.Т., Величкин В.И., Дойникова О.А // Геология рудных месторождений. 2018. Т.60. № 4. С. 392–400.
112. Успенский В.А., Коробенко И.Р., Ильичев А.В. Углефицированное органическое вещество в кайнозойских ураноносных породах Хиагдинского рудного поля (Забайкалье) // Материалы по геологии урановых месторождений. – 1985. – Вып. 96. – С. 64-73.
113. Учкудукский тип урановых месторождений Республики Узбекистан / Х.К. Каримов, Н.С. Бобоноронов. Ташкент: ФАН, 1996. 334 стр.
114. Халдей А.Е., Расулова С.Д., Коченов А.В. Историко-геологические предпосылки образования ураноносных палеодолин // Отечественная геология. 1998. № 5. С. 28-31.
115. Халезов А.Б. Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона – М.: ВИМС, 2009. 145 с.
116. Халезов А.Б. Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона. Разновидности месторождений типа несогласия в фанерозое. Минеральное сырьё. № 34. М.: ВИМС, 2017. 194 с.
117. Халезов А.Б. Далматовское месторождение урана. Минеральное сырьё. № 36. М.: ВИМС, 2018. 130 с.

118. Черневые фосфатные урановые руды Витимского плато (Бурятия) / О.А. Дойникова, Н.Н. Тарасов, П.М. Карташов, В.А. Петров // Радиохимия – 2020, том 62. – 04. – С. 349-358.
119. Филогенетическое разнообразие и потенциальная активность бактерий и грибов в подземных горизонтах месторождения урана / Т.Л. Бабич, Е.М. Семенова, Д.Ш. Соколова, Т.П. Турова, С.Х. Биджиева, Н.Г. Лойко, Г.И. Авдонин, Н.И. Луценко, Т.Н. Назина // Микробиология. – 2021. – Т. 90. – № 5. – С. 574–588.
120. Шарков А.А. Условия образования и генезис стратиформных ураново-редкометалльных месторождений Восточного Паратетиса. – Москва, 2011. – С. 184.
121. Шмариович Е.М. Экзогенные урановые месторождения (избранные труды) / Составители А.Д. Коноплев, И.Г. Печенкин, В.Н. Щеточкин. М.: ВИМС, 2007. 591 с.
122. Шуршалина М.А., Халдей А.Е., Шагарова В.Б. К вопросу о формах нахождения урана в гранитоидах Витимского плоскогорья (на примере Хиагдинского рудного поля) // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. – М.: ВИМС, 1989. – № 120. – С. 77–86
123. Холодов В.Н. Основы многостадийной фазовой дифференциации в осадочном породообразовании и рудогенезе. Москва, ГЕОС, 2020. – 142 с.
124. Экзогенные эпигенетические месторождения урана. Условия образования / Под. Ред. А.И. Перельмана. – М.: Атомиздат, 1965.
125. Эволюция угленосных формаций в истории Земли / П.П. Тимофеев. М.: Наука, 2006. –204 с.
126. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар, Геопринт, 2011. 742 с.
127. Япаскурт О.В. Литология: учебник для студ. высш. учебн. заведений. – Москва: Издательский центр «Академия», 2008. – 336 с.
128. Ясманов Н.А. Древние климаты Земли; Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. – 294 с.
129. Голубев В.Н. U-Pb системы и изотопный состав урана в урановом месторождении “песчаникового” (палеодолинного) типа месторождение Дыбрын, Витимский урановорудный район, Россия // В.Н. Голубев, И.В. Чернышев, А.В. Чугаев, А.В. Еремина, А.Н. Баранова, В.В. Крупская // Геология рудных месторождений– 2013, –Т.55. – № 6. – С. 467–480.
130. Dahlkamp F.J. Uranium Deposits of the World: Asia. Berlin Springer-Verlag, 2009.
131. Dahlkamp F.J. Uranium Deposits of the World: USA and Latin America. Berlin Springer-Verlag, 2010.
132. Dahlkamp F.J. Uranium Ore Deposits. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 460 p. (1993).
133. Geochemical, mineralogical and microbiological characteristics of sediment from a naturally reduced zone in a uranium-contaminated aquifer / К.М. Campbell, R.K. Kukkadapu, N.P.

Qafoku, A.D. Peacock, E. Leshner, K.H. Williams, J.R. Bargar, M.J. Wilkins, L. Figueroa, J. Ranville, J.A. Davis, P.E. Long // *Applied Geochemistry*. – 2012. – V. 27. – P. 1499–1511.

134. Geological Classification of uranium deposits and description of Selected Examples/ IAEA-TECDOC, Series-1842. Vienna, 2018, 415 p.

135. Pore structure evolution characteristics of sandstone uranium ore during acid leaching / Sheng Zeng, Yuan Shen, Bing Sun, Ni Zhang, Shuwen Zhang, Song Feng // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2021. – V. 53. – P. 4033–4041.

136. Surficial uranium deposit Report of the working group on uranium geology organized by the international atom energy Agency. IAEA, 1984.

137. Uranium mobility in organic matter-rich sediments: a review of geological and geochemical processes / S.A. Cumberland, G. Douglas, K. Grice, J.W. Moreau // *Earth-Science Reviews*. – 2016. – V. 159. – P. 160–185.

138. Senko J.M., Dewers T.A., Krumholz L.R. Effect of oxidation rate and Fe(II) state on microbial nitrate-dependent Fe(III) mineral formation // *Appl. Environ. Microbiol.* – 2005. – V. 71. – P. 7172–7177.

139. Effects of nitrate on the stability of uranium in a bioreduced region of the subsurface / W.-M. Wu, J. Carley, S.J. Green, J. Luo, S.D. Kelly, J. van Nostrand, K. Lowe, T. Mehlhorn, S. Carroll, B. Boonchayanant, F.E. Löffler, D. Watson, K.M. Kemner, J. Zhou, P.K. Kitanidis, J.E. Kostka, P.M. Jardine, C.S Criddle // *Environ. Sci. Technol.* – 2010. – V. 44. – P. 5104–5111.

140. In situ recovery of uranium – the microbial influence / C.M. Zammit, J. Brugger, G. Southam, F. Reith // *Hydrometallurgy*. – 2014. – V. 150. – P. 236–244.

Фондовая литература

141. Пешков П.А., Грязнов В.П., Макшанинов В.В. и др. Отчет о результатах предварительной разведки месторождений Хиагдинского рудного поля в Центральном Забайкалье с подсчетом запасов урана по состоянию на 1.05.1992. Отчет экспедиции №130 по геологическому заданию 1030-16 за 1986-1992 гг. Иркутск, 1993 Ф г.

142. Мезенов И.А., Дементьев П.К., Мусихин А.И. и др. Отчет Тургайской партии № 89 о результатах предварительной разведки Добровольного рений-редкоземельного-уранового месторождения в Северном Тургае в 4 книгах с графическими приложениями. Екатеринбург 1994 г.

143. Коченов А.В., Халдей А.Е., Шагарова В.Б. и др. Отчет по договору №626 «Изучить минералого-геохимические, литологические и геотехнологические особенности кайнозойских месторождений Витимского района с целью использования полученных данных для совершенствования поисковых критериев и подготовки объектов к промышленному освоению способом ПВ» Москва, 1989 Ф г.