

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва, 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»)

Научный руководитель: **Печенкин Игорь Гертрудович**

доктор геолого-минералогических наук,
советник генерального директора ФГБУ «ВИМС»

Официальные оппоненты: **Дойникова Ольга Александровна**

доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник ИГЕМ РАН

Бойцов Александр Владимирович

кандидат геолого-минералогических наук,
советник первого заместителя генерального
директора «Техснабэкспорт»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится «23» мая 2024 г. в 15:00 ч. на заседании диссертационного совета 24.2.364.02 в Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 23, аудитория 473.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе и на сайте: <http://mgri.ru/>.

Автореферат разослан: «___» _____ 2024 г.

Врио ученого секретаря
диссертационного совета,
канд. геол.-минерал. наук



А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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 серноокислотных растворов. Таким образом, понимание природных условий формирования и эволюции уранового оруденения песчаникового типа и его преобразования на стадии отработки способом СПВ является весьма актуальным.

Цель исследования – установить последовательность формирования рудовмещающих пород и урановой минерализации в базальных палеодолинах, а также причины наличия переотложенного и остаточного рудного вещества в процессе добычи способом СПВ.

Реализация данной цели предусматривает решение следующих **основных задач**:

- 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.

- Определить природу повышенных концентраций урана (остаточная или переотложенная) в рудовмещающих толщах после воздействия сернокислотных растворов.

Объект исследования: месторождения урана в осадочно-терригенных отложениях Зауральского, Витимского и Витимо-Каренгского районов.

Научная новизна работы

На основании проведенных исследований получены следующие новые данные:

- Установлена закономерность и последовательность образования определенных форм урана (ионно-сорбционная, минеральная и др.) на различных стадиях литогенеза.
- Определено значение углефикации растительного органического вещества (РОВ) в накоплении урановых концентраций.
- Показано влияние некоторых компонентов (РОВ, сульфиды, бактериальные сообщества) рудовмещающих пород на процесс добычи урана методом СПВ.
- 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 сернокислотных 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 исследования

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».

Положения, выносимые на защиту

1. 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.

2. 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.

3. 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.

Фактический материал и личный вклад соискателя. Основой настоящей диссертации послужили материалы, полученные в процессе полевых и камеральных исследований, проводившихся с 2011 по 2022 гг. в составе группы ФГБУ «ВИМС». Автор принимал участие в поисковых, поисково-оценочных и разведочных работах на месторождениях урана Витимского, Зауральского и Витимо-Каренгского районов в рамках хоздоговорных соглашений с АО «Урангео», АО «Русбурмаш» и АО «Далур». В процессе документации керна скважин диссертантом отбирались образцы и рудные пробы для проведения минералого-аналитических исследований и лабораторных геотехнологических испытаний. На основе полученных результатов и использования ретроспективных материалов автор обосновал стадийность формирования урановой минерализации, а также влияние литологического состава рудовмещающих отложений на процессы добычи методом СПВ.

Апробация работы и публикации. Основные результаты и отдельные защищаемые положения работы докладывались на: Ученом совете ФГБУ «ВИМС»; VII Российской молодежной научно-практической Школе с международным участием (Москва, 2018); Восьмой научно-практической школе-конференции молодых ученых и специалистов (Москва, 2019); V международном симпозиуме «Уран: Геология, Ресурсы, Производство» (Москва, 2021 г.); 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, 2023). 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 101 страницу, 51 иллюстрацию и 25 таблиц. *Введение* содержит цель и задачи исследования, информацию об актуальности работы, научной новизне и практической значимости, личном вкладе автора и апробации. В *первой главе* приведены данные о геологическом строении объектов исследования и их особенностях, приводящих к накоплению урановых концентраций. Во *второй главе* рассмотрена последовательность формирования урановых концентраций на различных стадиях литогенеза. *Третья глава* посвящена изучению влияния вещественного состава пород и руд на процессы добычи способом СПВ, а также определению природы повышенных концентраций урана (остаточная или переотложенная) в толщах после воздействия сернокислотных растворов. В *заключении* перечислены основные научные и практические результаты работы.

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.-м.н. И.Г. Луговской, к.г.-м.н. С.Д. Расуловой, к.г.-м.н. Тюленевой В.М., д.г.-м.н. Щеточкину В.Н., к.г.-м.н. Н.В. Леденевой, Г.И. Авдониной, М.А. Рогожиной, а также руководителю отдела урана и редких металлов к.г.-м.н. 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.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

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.

Урановые месторождения гидрогенного генезиса, локализованные в базальных палеодолинах, обладают определёнными рудогенетическими особенностями. Рудопроявления Витимо-Каренгского района приурочены к четвертичным торфяно-почвенным отложениям с сингенетическими урановыми

накоплениями. Месторождения Витимского района располагаются в локальных неогеновых палеорулах, выполненных делювиально-пролювиальными отложениями с урановыми концентрациями, образование которых связано с последовательным проявлением диагенетических и инфильтрационных процессов. Месторождения Зауральского региона контролируются широкими, протяженными палеорулами юрско-мелового возраста, урановое оруденение в пределах которых сформировано в результате длительных неоднократных окислительно-восстановительных инфильтрационных эпигенетических процессов.

Для рассматриваемых месторождений рудовмещающими породами служат терригенные континентальные образования, обогащенные органическим веществом. Растительный детрит имеет сингенетическое происхождение и представлен как крупными отдельными обломками различной степени сохранности, так и тонкодисперсной разностью, рассеянной в породе. Накопление рудовмещающих отложений происходило в гумидных климатических условиях после эпох корообразования.

Месторождение Орогочи и рудопроявления *Витимо-Каренгского* района расположены на восточной окраине Саяно-байкальской складчатой зоны, приурочены к торфяно-почвенным отложениям пойм современных рек, их образование обусловлено деятельностью ураноносных грунтовых вод (Миронов, 2015). Источником урана являются массивы гранитов с содержаниями урана $5-10 \times 10^{-4} \%$. Их формирование связано с мезозойской эпохой тектономагматической активизации (ТМА). Отсутствие тектонических движений в последующее мел-палеогеновое время способствовало формированию площадных кор выветривания с переходом урана в подвижную форму и обогащением терригенных отложений россыпными акцессорными минералами.

Урановое оруденение приурочено к верхней приповерхностной части осадочного разреза, представленного торфяно-почвенными, илистыми отложениями буровато-коричневого до черного цветов. Мощность отложений колеблется от 1 до 5 м, оруденение распространено до глубины порядка 2 м, радиоактивность достигает 30–40 мкР/час, а содержание урана варьирует от 0,01 % до первых процентов. Рудные залежи представляют собой вытянутые вдоль русла линзы либо имеют форму, согласную очертаниям массива. Длина рудных тел достигает 1 км при ширине от 350 до 450 м. Наиболее богатое оруденение приурочено к центральным частям залежей. Для поверхностных руд содержание органического углерода достигает 15 %, $S_{\text{общ.}} - 0,7 \%$, $Fe_2O_{3\text{общ.}} - 2,3 \%$. Концентрации урана коррелируются с содержаниями органического вещества. Коэффициент радиоактивного равновесия для поверхностных руд составляет меньше 1, что характерно для современных процессов миграции урана в период 5–7 тыс. лет (Сащенко, Стародубов, 2018). Урановые концентрации приурочены к растительным остаткам начальной (торфяной) стадии преобразований и представлены исключительно сорбционными формами (Пешков, 2015; Сащенко и др., 2022). Они локализируются в обводненных

поверхностных отложениях, накопление которых происходит в настоящее время на стадии седиментогенеза.

Витимский урановорудный район объединяет отдельные месторождения песчаникового типа в палеодолинных структурах в пределах Витимского плато базальтов Байкало-Витимской складчатой системы (Машковцев и др., 2010). В геологическом строении района выделяются породы фундамента протерозой-палеозойского возраста, образования кор выветривания мел-палеогенового времени, рудовмещающие вулканогенно-осадочные отложения неогена и базальты неоген-четвертичного возраста.

Фундамент имеет блоковое строение и представлен сложным сочетанием гнейсов, сланцев, мраморизованных известняков (PR_3 - PZ_1) и гранитов (PZ_{2-3}). Наиболее распространены радиогеохимически специализированные на уран гранитоиды баргузинского (PR_{2b}) и витимканского (γC_{2-3v}) комплексов. В рудоносных палеораспадках содержание урана в гранитах составляет $6,5 \times 10^{-4} \%$. Породы фундамента преобразованы процессами донеогенового корообразования, что способствовало переводу урана из акцессорных минералов в подвижную форму. Глинистый элювий кор выветривания послужил исходным материалом для формирования неогеновых делювиально-пролювиальных отложений.

Рудовмещающие распадки врезаны в породы фундамента и выполнены неогеновыми континентальными отложениями джилдинской свиты (N_{1-2dg}) мощностью до 80 м. В строении свиты выделяются три пачки (подсвиты): нижняя осадочная, средняя вулканогенно-осадочная и верхняя вулканогенная (Черняева и др., 2007). Породы нижней рудоносной пачки преимущественно сероцветные песчано-глинистые, плохосортированные, фациально невыдержанные как по разрезу, так и по латерали, со значительным содержанием растительного органического вещества. Формирование рудовмещающих отложений происходило в гумидных климатических обстановках с накоплением большой массы растительности. Плато-базальты верхней пачки перекрывают рудовмещающие отложения.

Месторождения представлены отдельными залежами на глубине от 10 до 300 м, форма рудных тел линзовидная, вытянута вдоль палеораспадов, длина достигает 4,5 км, ширина – от 0,2 до 1 км. Содержание урана варьирует от 0,01 % до первых процентов, рудовмещающие отложения обогащены растительным детритом, и, как следствие, содержание $C_{орг}$ достигает 2–5 %, а в некоторых разностях – 21–25 %. Урановое оруденение преимущественно локализуется в основании осадочного разреза, непосредственно на отложениях коры выветривания.

Урановая минерализация представлена тонкодисперсными, в разной степени раскристаллизованными гелями, отвечающими по составу нингиоиту (U-P-Ca) с примесью редкоземельных элементов (Тарханова и др., 2017). В единичных случаях выявлены микрокристаллические минеральные агрегаты нингиоита (Дойникова, Петров, 2020).

Возраст оруденения месторождений Витимского района варьирует от 20 млн лет и значительно моложе (Голубев, 2013, 2016) что, вероятно, в том числе связано с разновременным заложением палеораспадов (Тарханова, Прохоров, 2017).

Зауральский урановорудный район объединяет месторождения в пределах одноименного поднятия и краевой части палеозойской Западно-Сибирской платформы (Халезов, 2009). В строении района принимают участие породы палеозойского фундамента (PZ-MZ), отложения триас-юрских кор выветривания, аллювиальные образования средне-верхнеюрской таборинской свиты (J_{2-3tb}), мел-четвертичные осадки, перекрывающие эрозионные долины. Фундамент сложен различными по составу породами: сланцами, песчаниками, известняками, туфопесчаниками, гравелитами, базальтами, липаритами и риолитами. Для последних характерны повышенные содержания урана – $1-5 \times 10^{-3} \%$.

Эрозионные палеодолины, осложняющие строение кровли фундамента, выполнены юрскими рудовмещающими отложениями таборинской свиты. В ее строении выделяют несколько аллювиальных ритмов, которые перекрываются меловой глинистой красноцветной пачкой. Аллювиальные отложения представлены хорошо сортированными сероцветными проницаемыми песчаниками с линзами алеврито-глинистых пород и обогащены сульфидами железа. Сульфиды представлены несколькими генерациями, которые в том числе развиваются по растительным остаткам. В целом породы содержат большое количество растительного детрита бурогоугольной стадии преобразования, $S_{орг}$ достигает 5 %. Накопление рудовмещающих отложений происходило в гумидных климатических обстановках.

Рудные тела протяженностью от 400 до 4500 м, шириной – 50–400 м, имеют линзовидную либо пластообразную морфологию, локализуются на глубине 450–550 м. Среднее содержание урана колеблется от 0,01 % до первых процентов. Оруденение приурочено к границе сероцветных и белоцветных пород, что является следствием проявления неоднократных окислительно-восстановительных процессов.

Урановая минерализация представлена оксидами и силикатами нескольких генераций (Сащенко и др., 2022). Формирование минеральных форм урана обусловлено многократной сменой инфильтрационных и элизионных режимов в меловое время (110–140 млн лет).

Сравнительный анализ геологических характеристик (Таблица 1) рассмотренных выше объектов подтвердил ранее установленные факторы формирования промышленного уранового оруденения в локальных структурах, а именно наличие: радиогеохимически специализированных пород фундамента в области сноса; эпох корообразования, обеспечивающих перевод урана в подвижную форму и накопление обломочного материала, необходимого для заполнения депрессионных структур; гумидного климата (Кисляков, Щеточкин, 2000).

Таблица 1 – Основные характеристики геологического строения рассматриваемых гидротермальных месторождений урана

| <i>Типовые месторождения</i> | <i>Орогочи</i> | <i>Хиагдинское</i> | <i>Далматовское</i> |
|--|--|---|---|
| Урановорудный район | Витимо-Каренгский | Витимский | Зауральский |
| Геотектоническое положение | Байкальская складчатая область | Байкальская складчатая область | Западно-Сибирская платформа |
| Ранг месторождения и объем запасов (т) | 350 | 2000–9000 | 5000–10000 |
| Радиогеохимически специализированные породы фундамента и содержания в них урана, % | Mz интрузивы, $5-15 \times 10^{-4}$ | Pz витимканские, граниты $6,5-6,7 \times 10^{-4}$ | Pz и Mz сланцы и липариты, $1-5 \times 10^{-3}$ |
| Эпохи корообразования | К–Р | К–Р | Т–J |
| Рудовмещающие породы | Четвертичные торфяно-почвенные отложения пойм (Q) | Неогеновые делювиально-пролювиальные отложения (N _{dj}) | Юрские аллювиальные отложения (J _{2-3tb}) |
| Климатические условия осадконакопления | Резко континентальный, гумидный | Мягкий, влажный с равномерным количеством осадков | Умеренно теплый и влажный, гумидный |
| Тип растительности | Преимущественно хвойная | Широколиственные леса | Широколиственные леса |
| 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 их формирования | Сорбция урана на растительном детрите (5–7 тыс. лет) | Преимущественно поликомпонентные гели, отвечающие по составу нингииту (P–Ca–U) (от 20 млн лет и моложе) | Оксидная и силикатная минеральные формы (110–140 млн лет) |

 Ведущие факторы экзогенного рудообразования, установленные автором

Диссертантом определено, что на стадии седиментогенеза формируются только малые месторождения с объемом запасов первые сотни тонн (Орогочи) с накоплением урана на растительном детрите торфяной стадии. Последующие

диагенетические и особенно эпигенетические процессы способствовали преобразованию растительного детрита до бурогоугольной стадии и перераспределению урана с формированием промышленных концентраций, отрабатываемых способом скважинного подземного выщелачивания.

Таким образом, длительность рудообразующего процесса и стадийные преобразования рудовмещающих пород определяют концентрирование урана и, соответственно, масштаб рудных объектов.

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 породообразования и наложенных эпигенетических процессов.

Формирование рудовмещающих континентальных отложений на месторождениях базальных палеодолин обусловлено последовательным развитием стадий литогенеза, начиная со стадии накопления осадка (седиментогенез), через преобразование осадка (диагенез) и заканчивая привнесом урана инфильтрационными водами (эпигенез).

На стадии седиментогенеза (I стадия), в условиях доступа кислорода, после отмирания растительности начинается немедленное ее преобразование. Геохимические обстановки начальных этапов седиментогенеза и накопления урана изучены на рудопроявлениях Витимо-Каренгского района. Рудовмещающие отложения практически полностью сложены растительными остатками начальной стадии преобразования – торфяной. Разложение остатков и формирование новых гумусовых соединений обуславливают формирование кислой среды и темно-коричневых восстановительных вод. Рудные концентрации имеют вуалевидное распределение треков радиоактивности, незначительно сгущаясь над растительными остатками. Концентрации урана представлены тонкодисперсными аморфными выделениями (Водяницкий и др., 2019). Повышенные содержания урана приурочены к периферийным частям растительности (1,7 %), постепенно уменьшаясь к центру (Рисунок 1-1). Несмотря на процентные содержания урана, его минеральные формы не выявлены, а рудные концентрации представлены только сорбционными накоплениями.

При постепенном погружении осадков и наступлении стадии формирования пород (диагенеза), прекращении доступа свободного кислорода происходят биологические и физико-химические реакции уравнивания системы и преобразования осадка, что связано с развитием анаэробных бактерий, преимущественно сульфатредуцирующих.

На начальной стадии диагенеза (II) в пределах растительных остатков сохраняются сорбционные накопления урана, которые распространяются по всему детриту, продуцируется сера биогенной природы (Рисунок 1-2).

На указанном этапе не образуются сульфиды железа, а также не происходит обогащение остатка элементами-спутниками урана: P, Ca, Al и Si.

С развитием сульфатредукции, на следующей стадии диагенеза (III), происходит формирование сульфидов железа в клеточной структуре растительности. Содержание сорбционного урана постепенно увеличивается с 1,4 до 3 % (Рисунок 1-3). Дальнейшее псевдоморфное развитие пирита (стадия IV) по растительной ткани сопровождается сорбцией и восстановлением урана; в результате его содержание в углистых остатках достигает 10,5 % (Рисунок 1-4). При формировании скоплений фрамбоидов пирита (стадия V), которые полностью псевдоморфно замещают растительные остатки, и происходит урановое минералообразование (Рисунок 1-5).

На месторождениях Витимского района происходит постепенное преобразование урановой минерализации от сорбционных накоплений на ранней стадии диагенеза (II. 1) через поликомпонентные гели U-P-Ca состава (III-IV стадии) до формирования минеральных форм (стадия V) (Тарханова, 2014, 2017; Дойникова, 2020).

Одновременно с развитием диагенетических процессов в проницаемые отложения поступали ураноносные инфильтрационные воды. Так в растительном остатке выявлены две области с различным содержанием урана и сопутствующих элементов (Рисунок 2). Непосредственно углистый органический остаток характеризуется содержаниями урана сорбционной природы в количестве 0,19 % и относительно повышенными содержаниями серы – 2,28 % (Рисунок 2А), при этом поля распространения этих элементов полностью совпадают с областью распространения углерода, что соответствует начальным (II-III) стадиям диагенетических преобразований. Область повышенных содержаний урана (9,7 %) совпадает с полями распространения повышенных содержаний фосфора (3,8 %), кальция (3,4 %), алюминия (11 %) и кремния (14,3 %) (рисунок 2 Б). Указанная область сформировалась в результате взаимодействия инфильтрационных вод, содержащими помимо урана также P, Ca, Al и Si, и последующего замещения участка растительного детрита.

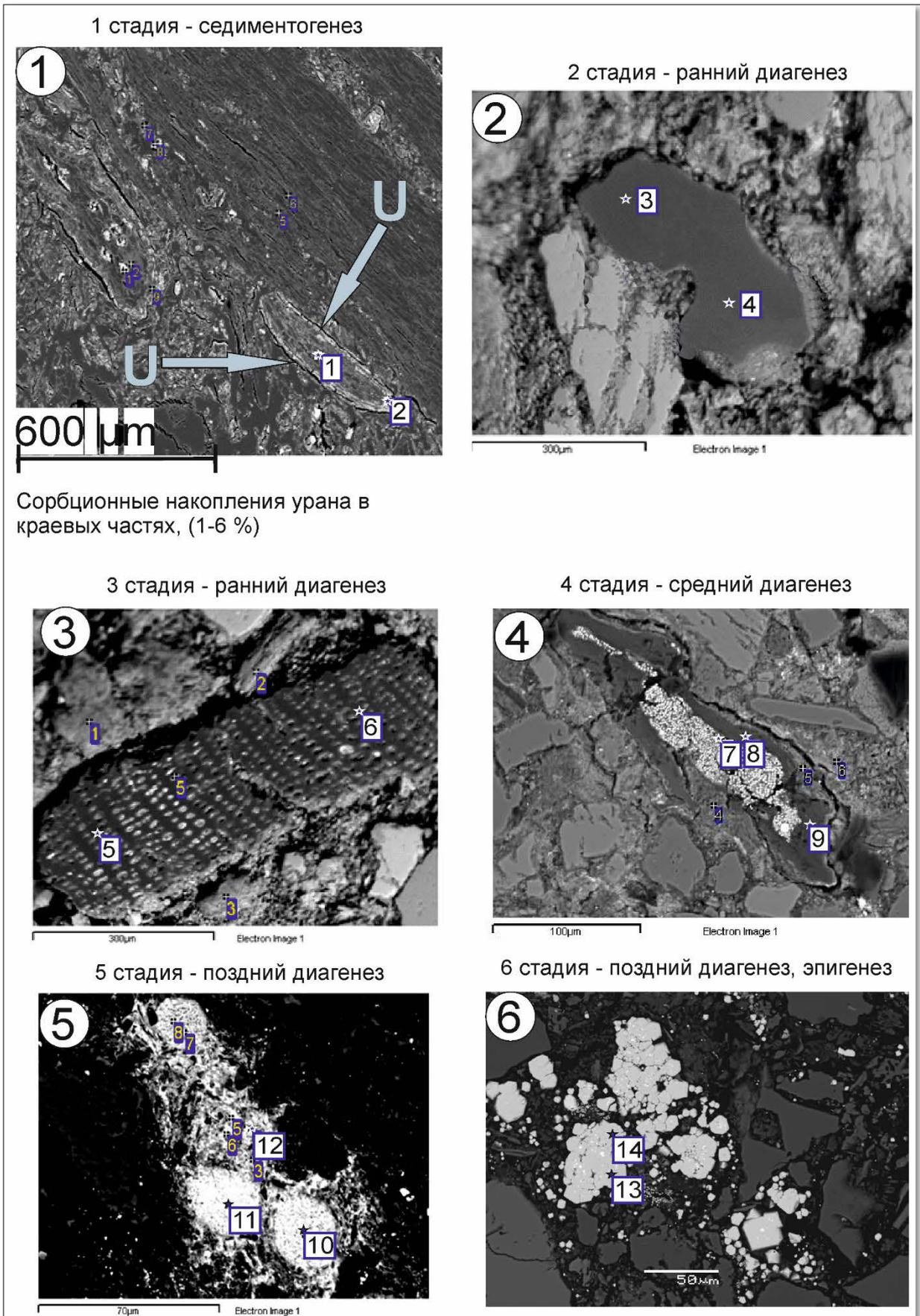


Рисунок 1. Типы выделений урановых концентраций на различных стадиях литогенеза. Результаты микрозондовых анализов см. в Таблице 2

Таблица 2 – Результаты микрозондового анализа к рисунку 1

| № спектра | Содержание элементов (мас. %) | | | | | | | |
|-----------|-------------------------------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| | Al | Si | P | S | Ca | Fe | U | |
| 1-1 | 1 | 0,14 | 0,05 | - | - | 1,23 | 0,13 | 0,43 |
| | 2 | 0,85 | 0,13 | - | 0,2 | 5,36 | 0,45 | 1,67 |
| 1-2 | 3 | 0,27 | 0,19 | 0,06 | 3,12 | 0,02 | 2,62 | 1,24 |
| | 4 | 0,16 | 0,13 | 0,11 | 3,24 | 0,02 | 2,86 | 1,37 |
| 1-3 | 5 | 0,11 | 0,1 | 0,06 | 4,36 | - | 2,87 | 1,64 |
| | 6 | 0,09 | 0,12 | 0,07 | 4,48 | 0,04 | 3,04 | 1,93 |
| 1-4 | 7 | 4,51 | 5,47 | 2,28 | 6,35 | 1,90 | 4,83 | 10,52 |
| | 8 | 0,16 | 0,33 | 0,09 | 5,60 | 0,8 | 0,78 | 2,56 |
| | 9 | 0,64 | 0,8 | 0,03 | 5,58 | 0,9 | 0,4 | 3,39 |
| 1-5 | 10 | 0,25 | | 3,44 | 33,96 | 4,18 | 29,47 | 12,26 |
| | 11 | 0,39 | 0,48 | 3,79 | 31,30 | 4,70 | 27,01 | 13,46 |
| | 12 | 5,09 | 8,78 | 5,15 | 7,63 | 6,58 | 7,86 | 17,41 |
| 1-6 | 13 | - | 0,33 | 0,16 | 28,03 | 0,9 | 25,17 | 28,35 |
| | 14 | - | 0,34 | 0,13 | 32,74 | 0,85 | 28,42 | 25,64 |

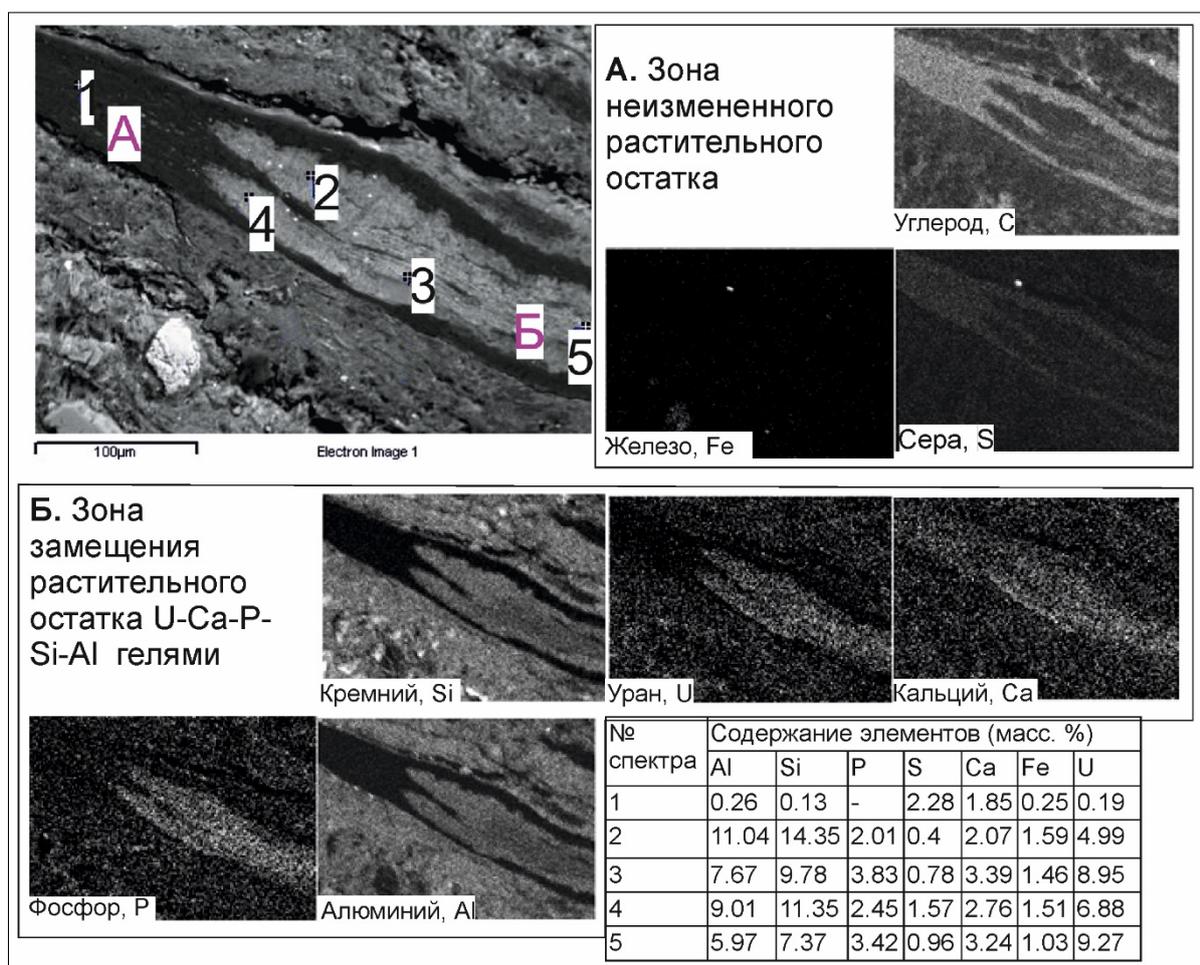


Рисунок 2. Замещение растительного обломка (А) поликомпонентным U-Ca-P-Si-Al гелем (Б). Изображение в обратно-рассеянных электронах; А – поля распределения элементов в растительном детрите (углерод, сера и железо); Б – поля распределения элементов поликомпонентных гелей нингиоитового состава (U, Ca,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

Для формирования минеральных форм урана и сульфидов железа на месторождениях Зауральского региона был необходим длительный процесс диагенетических преобразований, с неоднократной сменой окислительных и восстановительных геохимических условий. Урановая минерализация представлена тремя разновидностями оксида урана. Первая разновидность развита в цементе песчаника среди терригенных зерен и пирита и представлена плотными выделениями неправильной формы с трещинами усыхания. Вторая также концентрируется в цементе и по краям обломочных зерен и кристаллов пирита, а по трещинам проникает внутрь зерен, где представлена округлыми обособлениями с радиально-лучистым строением. Третья разновидность микронной размерности характерна для центральной части кристаллов пирита (см. рис. 1–6). Формирование минеральных форм оксида урана внутри кристаллов и агрегатов пирита происходит на поздней (VI) стадии диагенеза. Наличие большого разнообразия форм пирита и перехода его одного типа в другой, а также тесная пространственная связь между сульфидами железа и минералами урана предполагают неоднократное осаждение урана, а также длительность и неравномерность процессов уранового рудогенеза.

По мере развития диагенеза происходит постепенное преобразование растительного детрита, в том числе формирование новых устойчивых соединений – гуминовых кислот (стадия VII). Они совместно с ураном, фосфатной группой, алюминием и кремнием образуют устойчивые органоминеральные соединения (гуматы), способные мигрировать в водных условиях (Макаров, 2009). Так, на месторождении Вершинное в глинистом цементе песчаника, а также в трещине гранита было выявлено аналогичное аморфное углеродистое вещество, содержащее U, Ca, P, Al, Si, Mg, Fe, S (Тарханова и др., 2014). Оно имеет глобулярное строение, а в его центре расположено округлое выделение углерода, которое окаймляется полями распространения U, Ca и P (Рисунок 3).

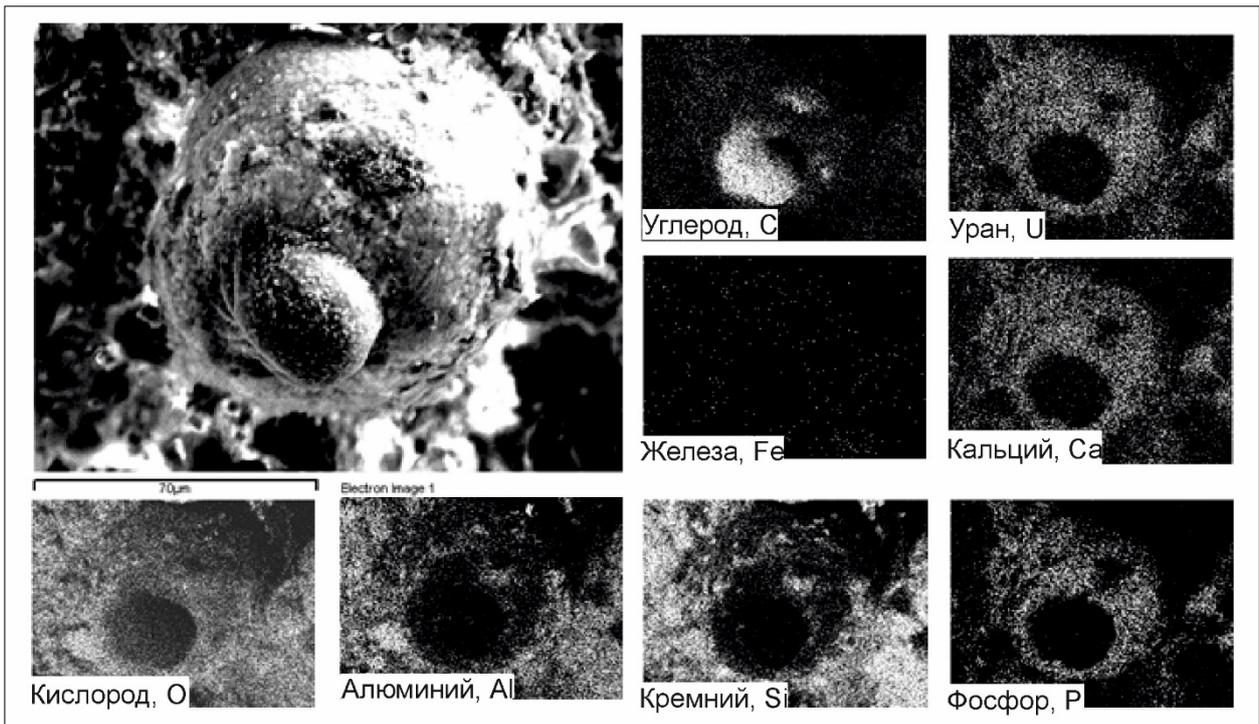


Рисунок 3. Глобулярное выделение нингиюита в тесном сростании с округлым обособлением углеродистого вещества из трещиноватого гранита. Изображение в обратно-рассеянных электронах, РСМА. По Г.А. Тархановой (Особенности ..., 2014)

Таким образом, при последовательном проявлении стадий диагенеза происходит постепенное увеличение содержаний урана в пределах растительных остатков: от минимальных концентраций (1,2 %) при сорбционной природе накоплений на ранних стадиях до формирования минеральных форм с повышенными содержаниями урана (28 %) на более поздних. Также при инфильтрационном поступлении ураноносных вод происходит замещение части растительных остатков без формирования минеральных форм. При деструкции растительных остатков происходит образование новых устойчивых органоминеральных соединений (гуматов), которые мигрируют в водных условиях.

Последовательность и длительность процесса литогенеза определяют тип и сложность урановой минерализации, сопровождающейся преобразованием органического вещества и бактериальных сообществ, представляя собой основной фактор, влияющий на технологические особенности добычи урана способом скважинного подземного выщелачивания.

Третье защищаемое положение.

Наличие повышенных содержаний урана – остаточных и переотложенных после обработки руд способом СПВ – обусловлено типом урановой минерализации, литологическим составом рудовмещающих пород, включая растительное органическое вещество и сульфиды металлов.

Урановая минерализация, сформированная на стадиях литогенеза, представленная различными агрегатными состояниями (от сорбционных накоплений до минеральных форм), является основным фактором, влияющим на процессы подземного выщелачивания. Для растворения каждой отдельной фазы урановой минерализации необходимо различное время закисления рудных блоков и концентрации кислоты, часто с добавлением окислителя. На основании многочисленных лабораторных опытов, известно, что в первую очередь растворяются сорбционные образования, сформированные на I–II стадиях диагенеза. Более поздние совместные выделения урановых минералов и пирита, а также урановая минерализация, развитая в клеточной структуре растительных остатков, формирование которых происходит на поздних (III–IV) стадиях диагенеза, менее благоприятны для выщелачивания.

В то же время после завершения отработки руд, как правило, остаются участки с повышенным содержанием полезного компонента. Их природа обусловлена наличием горизонтов как с остаточными, так и с переотложенными концентрациями урана.

На *Хиагдинском месторождении* на месте проведения двухскважинного опыта рудовмещающие породы представлены сероцветными плохо сортированными разнозернистыми песками, в которых количество глинистого цемента, преимущественно каолинитового состава, колеблется от 13 до 27 %. Породы также обогащены тонкодисперсным углистым веществом, что придает им восстановительные свойства, при этом содержание органического углерода достигает 20 %. Промышленное оруденение локализуется в основании осадочного разреза, непосредственно на отложениях коры выветривания. Среднее содержание урана составляет 0,082 % на участке ПВ-82 и 0,025 % на участке ПВ-89, что соответственно выше и ниже среднего значения по месторождению (0,039 %).

Степень извлечения урана на участке ПВ-82 составила 56 %. Детальное изучение его содержания в керне контрольных скважин позволило установить, что степень извлечения металла неоднородна в различных частях разреза. По вертикали разреза для проницаемых разностей она составляет 92–95 %, а для более плотных алевроито-глинистых пород, наиболее обогащенных растительным детритом и пиритом, – 50–70 %.

На участке, наиболее близко расположенном к нагнетательной скважине, среднее извлечение урана по разрезу составляет 79 %, а его среднее *остаточное* содержание – 0,008 % при начальном значении 0,04 %. В центральной части опытного участка степень извлечения урана составляет только 33–34,8 %, при этом выделяются 2 горизонта, в которых содержание урана после выщелачивания превышает исходное, т. е. происходит техногенное обогащение пород ураном – переотложение. Данные уровни *переотложения* приурочены к алевроито-глинистым прослоям, обогащенным углефицированным растительным детритом. Этот процесс происходит преимущественно на границе разнозернистых песков и плотных глинистых разностей.

Изучение керна контрольных скважин после промышленной отработки

позволило выявить минеральные особенности остаточного и переотложенного урана. На месте проведения добычи урана его содержание изменяется от 0,0003 до 1,08 %, причем повышенные концентрации приурочены к основанию разреза, а минимальные – к верхней части рудоносного горизонта.

В верхней части разреза с содержаниями урана в тысячные и сотые доли процента методами микронзондовой микроскопии он диагностирован только в зернах циркона и оксидов титана, а также в углистых растительных остатках, в которых содержание полезного компонента не превышает 0,25 %. В указанных горизонтах значение коэффициента радиоактивного равновесия (КРР) всегда превышает 1 и колеблется от 1,3 до 49,8, что характеризует интервал как горизонт выщелачивания урана. Таким образом, его незначительные содержания в растительном детрите и обломочных зернах относятся к остаточным.

В основании осадочного разреза с содержаниями урана 0,01–0,58 % значение КРР ниже 1 (0,5–0,6), что определяет интервал как зону привноса (переотложения) урана. Его минеральная фаза диагностирована внутри кварцевого зерна, где она замещает кристалл пирита. Так как в тонких трещинках в кварце урановая минерализация развита вокруг сульфидов железа, то она определяется как наложенная. По данным РКФА автором совместно с коллегами из ВИМСа диагностирован минерал шестивалентного урана – скупит, который является продуктом окисления минералов четырехвалентного урана. Также нами был выявлен переотложенный уран с концентрациями до 2,8 % в барите в ассоциации с сульфидом.

В нижней части осадочного разреза фиксируются горизонты со значениями КРР, близкими к 0,9, что может свидетельствовать как о незначительном привносе урана, так и о наличии остаточного. По сравнению с вышележащей частью разреза интервал значительно обогащен глинистой составляющей, которая характеризуется слабым техногенным воздействием кислотного выщелачивающего раствора и присутствием трещин усыхания (Рисунок 4–1). При микронзондовом исследовании установлено, что в глине широко распространены скопления мелкого фрамбоидального пирита в ассоциации с Са–Р–U гелями (Рисунок 4–2). Соотношения элементов в поликомпонентных гелях различны, в единичных случаях встречены более раскристаллизованные типы. Также в глинистых разностях диагностируются видимые органические остатки, обогащенные ураном, фосфором и кальцием (Рисунок 4–3). Растительные обломки глинистой составляющей с остаточным ураном характеризуются содержаниями до 0,96 %.

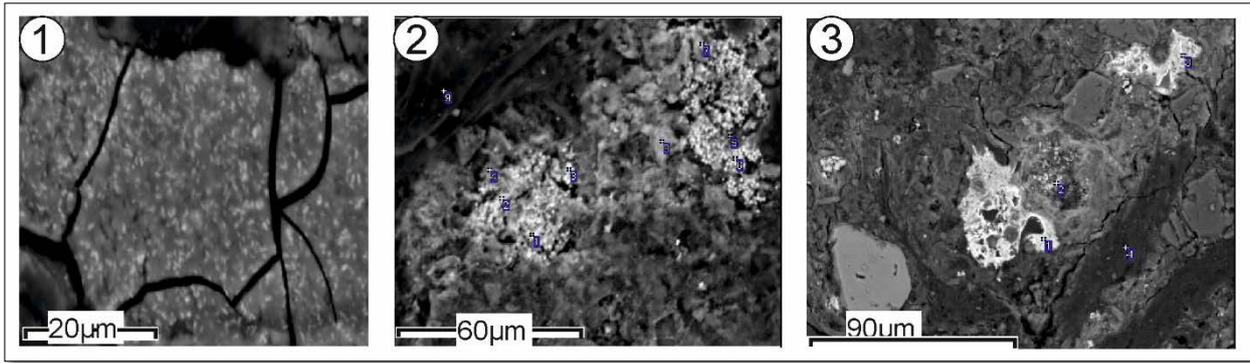


Рисунок 4. Состояние рудовмещающих пород на месте добычи урана (Хиагдинское месторождение)

1 – общий вид глинистой составляющей, 2 – ассоциация дисперсных скоплений U–P–Ca поликомпонентных гелей и пирита в глине, 3 – переотложенный уран на барите (белое) и остаточные содержания урана в растительном детрите (светло-серые окаймляющие участки)

Таким образом, на Хиагдинском месторождении повышенные значения урана после выщелачивания преимущественно представлены остаточными содержаниями, которые связаны со слабым воздействием кислоты на глинистые породы и неполным выщелачиванием урана из глинистых разностей, обогащенных растительными детритом.

На *Добровольном месторождении* на месте проведения двухскважинного опыта диссертантом совместно с коллегами было изучено состояние рудовмещающего горизонта по истечении 30 лет. Пробы с высоким содержанием урана приурочены к сероцветным разнозернистым пескам с большим количеством органических остатков и обилием различных по морфологии и размерам дисульфидов железа.

При изучении микронзондовым методом кеков выщелачивания, полученных при лабораторных опытах по выщелачиванию, установлено, что остаточная урановая минерализация приурочена к центральным частям пиритовых конкреций, т. е. образована на поздних стадиях диагенеза и эпигенеза (V стадия). В контрольной скважине, на месте проведения двухскважинного опыта, содержание урана преимущественно составляет 0,004 %. Значение КРР колеблется от 2,6 до 16, что свидетельствует о процессе выщелачивания металла. При этом фиксируется 2 уровня с его концентрацией 0,3–1 %. Значение КРР в этом случае составляет 0,5, что характеризует данные уровни как горизонты, где происходит привнос (переотложение) полезного компонента. Урановое вещество на указанных уровнях приурочено к крупным пиритовым конкрециям (Рисунок 5–1), где оно установлено в центральной части, а также в виде внешней каемочки. Так как в исходных породах уран находился в том числе и в центральной части пиритовых конкреций (Рисунок 5–2), можно утверждать, что его скопления в центральной части конкреций – остаточные.

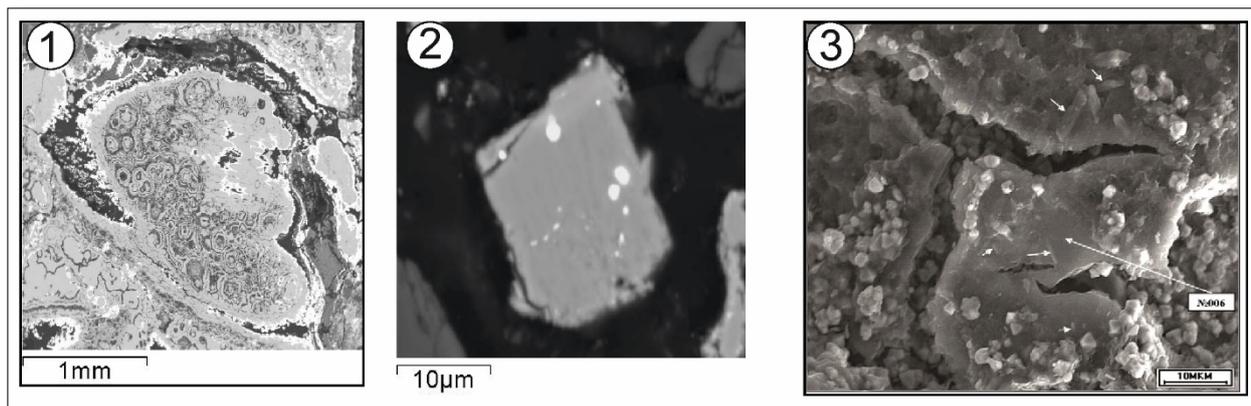


Рисунок 5. Остаточная и переотложенная минерализация в породах Добровольного месторождения

1 – пиритовая конкреция с остаточным содержанием урана в центре (яркое, белое) и переотложенным ураном в краевых частях, 2 – кристаллы пирита с урановой минерализацией (яркие белые вкрапления) после воздействия кислоты, 3 – поликомпонентные урансодержащие гели с трещинами усыхания, по поверхности гелей развиваются мелкие кристаллы пирита

На растровом электронном микроскопе по поверхности пиритовой конкреции и зерен кварца фиксируются столбчатые выделения гипса. В ассоциации с ними находится тонкокристаллический пирит (см. рис. 5–3).

Также выявлен многокомпонентный урансодержащий гель, который присутствует в виде тонкой пленки с трещинами усыхания и развитыми по его поверхности кристаллами гипса и пирита, что подтверждает его переотложение, так как гипс является основным новообразованным компонентом при СПВ (Солодов, 2017). Таким образом, остаточные содержания урана связаны с совместным выделением урановой и сульфидной минерализации на поздних стадиях литогенеза, а переотложенная урановая минерализация сопряжена с формированием контрастного восстановительного барьера, созданного растительным детритом и сульфидами железа под воздействием технологического выщелачивающего раствора.

Таким образом, обнаружена степень влияния различных типов пород, обогащенных растительным органическим веществом, на отработку руд способом СПВ, и раскрыта природа остаточных и переотложенных содержаний урана на месте проведения добычи. Внедрение полученных результатов несомненно повысит эффективность применения СПВ.

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 бурогоугольной стадии. По мере нарастания стадийных преобразований происходит постепенное увеличение содержания 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 обрабатываться 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 обработку руд данного типа.

Список опубликованных работ автора по теме диссертации

В рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. Самоочищение продуктивного горизонта на месте проведения двухскважинного опыта по выщелачиванию урана на Добровольном месторождении (Курганская область) / **А.В. Сащенко**, Г.И. Авдонин, Г.А. Тарханова, М.Д. Носков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. № 5. С. 137–147.

2. **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. С. 16–24.

В других изданиях:

3. Автоочистка остаточных техногенных растворов двухскважинного опыта ПВ-89 на Добровольном месторождении урана / М.Д. Носков, А.Г. Кеслер, Т.С. Теровская, Ю.И. Лаптев, Г.И. Авдонин, **А.В. Сащенко** // Труды Пятого Международного симпозиума «Уран: геология, ресурсы, производство». – М.: ФГБУ «ВИМС», 2021. С. 402–408.

4. Особенности формирования современных месторождений урана в почвенно-торфяных отложениях Витимо-Каренгского района / **А.В. Сащенко**, В.М. Тюленева, А.В. Стародубов, А.А. Киселев // Тезисы докладов Восьмой научно-практической школы-конференции молодых ученых и специалистов. – М.: ФГБУ «ВИМС», 2019. С. 91.

5. Оценка экологической безопасности добычи урана методом СПВ с точки зрения возможности самоочищения подземных вод на примере Добровольного месторождения урана / Г.И. Авдонин, М.Д. Носков, Г.А. Тарханова, **А.В. Сащенко** // Сборник материалов VI Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные материалы в среде обитания человека». Томск, 2021. Том 1. С. 49–53.

6. 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.

7. **Сащенко А. В.** Ассоциация углеродистого растительного вещества и урановой минерализации в пределах Витимо-Каренгского и Витимского урановорудного районов // Молодые – Научкам о Земле: в 7 т. Материалы X Международной научной конференции молодых ученых «Молодые – Научкам о Земле». – М.: РГГРУ, 2022. С. 100–105.

8. **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. – М.: ИГЕМ РАН. 2018. С. 309.

9. **Сащенко А.В.**, Тарханова Г.А. Связь урановой минерализации и углефицированного растительного детрита на ранних стадиях литогенеза на палеодолинных месторождениях Забайкалья // Экзолит – 2023. Сб. научных материалов. – М.: МАКС Пресс, 2023. С. 174–178.

10. **Сащенко А.В.**, Тюленева В.М. Генетические особенности урановорудных концентраций с дефицитом радия в почвенно-торфяных отложениях Витимо-Каренгского района (Северное Забайкалье) // Труды Пятого Международного симпозиума «Уран: геология, ресурсы, производство». – М.: ФГБУ «ВИМС», 2021. С. 251–257.

11. **Сащенко А.В.**, Тюленева В.М. Современные накопления урана в почвенно-торфяных отложениях Витимо-Каренгского района (Северное Забайкалье) // Сборник материалов VI Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные материалы в среде обитания человека». Томск, 2021. Том 1. С. 517–522.