

Ю.А. Фомин, Ю.Н. Демихов, Е.Г. Сушук
Институт геохимии окружающей среды НАН и МЧС Украины

СИСТЕМА УРАНОВОРУДНЫХ АЛЬБИТИТОВ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ПОВЕРХНОСТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА И/ИЛИ ТЕХНОГЕННОЙ ОПАСНОСТИ

Рассмотрены особенности поведения урана в системе: докембрийские ураноносные альбититы и вмещающие их породы Кировоградского мегаблока — мезокайнозойская зона гипергенеза — современные подземные и поверхностные воды. На основе проведенного исследования, а также сравнения этого района Украинского щита со сходным ураноносным районом Канадского щита оценены перспективы формирования в пределах блока поверхностных урановых концентраций. Полученные данные предлагается использовать для прогнозирования и поисков поверхностных месторождений и изучения техногенных рисков.

Введение

Эволюция урановорудных альбититов, генерированных в раннем докембрии как эндогенные гидротермально-метасоматические системы и испытавших затем трансформацию, включая гипергенез в мезокайнозое (формирование коры выветривания и позднюю окислительно-восстановительную минерализацию), позволяет отнести их к уникальной природной лаборатории. Помимо совершенствования теории рудообразования и всестороннего учета влияния техногенных факторов, исследование этих месторождений позволяет рассматривать их как потенциальный источник новых (природных и/или техногенных) поверхностных концентраций урана и сопутствующих элементов, а также как естественную модель долговременного «хранилища» радиоактивных веществ.

Поверхностными концентрациями (месторождениями) U принято называть молодые, не древнее третичных, или даже современные ураноносные осадочные породы и почвы, сформированные грунтовыми водами вблизи поверхности или на небольшой глубине [10]. Судя по мировому опыту [2, 8, 10, 15], они не обязательно связаны с переотложением более древних руд; как правило, их источниками становятся породы с фоновыми или близкими к фоновым содержаниями урана. При их образовании существенное значение имеют ландшафтно-геохимические условия, хотя, как подчеркивает Д.Р. Бойл [2], климат определяет «не сам факт образования месторождения, а скорее тип его», поэтому «наиболее важным для направления поисков (таких концентраций) является определение с генетических позиций благоприятных обстановок рудообразования (именно) в данной климатической зоне». Важно отметить значительную (10–15%) и все возрастающую долю таких месторождений в мировых запасах металла и высокую их рентабельность [10].

В статье рассматриваются закономерности поведения урана в системе альбититы и вмещающий их эдукт → зона их гипергенеза → гидросфера и проводится сравнение района украинских объектов с сходным районом Канадского щита [8]. На этой основе делается попытка оценить раннедокембрийский урановорудный район Кировоградского мегаблока с точки зрения перспективного источника поверхностных концентраций урана.

Объектами исследования являются месторождения урана альбититовой формации, расположенные в пределах наиболее продуктивных тектоно-метасоматических зон Кировоградского блока Украинского щита [3, 7]. Кировоградская зона представлена Севериновским, Мичуринским (включая рудопроявление Обгонное), Северо-Коноплянским и Юрьевским месторождениями. Звенигородско-Анновская зона показана на примере Ватутинского месторождения. В качестве самого представительного примера Центральноукраинского района дано Новоконстантиновское месторождение.

Краткая характеристика объектов

Изученные тектоно-метасоматические зоны (и месторождения) отличаются своим пространственным положением относительно гранитно-купольной структуры Кировоградского мегаблока. Месторождения Кировоградской зоны находятся в восточной краевой части купола и локализованы в гетерогенной гранито-мигматито-гнейсовой толще (Мичуринское месторождение), иногда с преобладанием мигматитов (Севериновское месторождение) или гнейсов с аплит-пегматоидной лейкосомой (Северо-Коноплянское, Юрьевское месторождения), вблизи относительно небольших массивов порфиридных или аляскитовых гранитов кировоградского комплекса. Ватутинское месторождение расположено симметрично предыдущим в западной части купола в толще переслаивания мигматитов и аляскитовидных гранитов типа кировоградских, с участием отдельных пластов гнейсов. Новоконстантиновское месторождение залегает непосредственно в трахитоидных гранитах Новоукраинского массива, которые в составе эдукта доминируют; отмечаются также аплит-пегматоидные граниты и останцы гнейсов.

Исходные породы на всех месторождениях представлены существенно биотитовыми гнейсами с кордиеритом, гранатом, графитом и сульфидами железа, которые в зависимости от интенсивности ультраметаморфизма имеют различную степень сохранности, но изначально относятся к одному литолого-стратиграфическому уровню в рамках ингуло-ингулецкой серии [21]. Общим для месторождений является также проявление сингранитизационного кремне-калиевого метасоматоза в виде широких ореолов микроклинов или узких линейных кварц-микроклиновых зон пегматоидного облика и связь щелочного метасоматоза с зонами объемного и линейного катаклаза и сопровождавшего их диафтореза как структурной основой. Среди альбититов, которые накладываются на диафориты, отмечаются эпидот-хлоритовые, эгирин-рибекитовые, а также (на Новоконстантиновском месторождении) диопсид-гранатовые с волластонитом [3] типы. Урановая минерализация связана, в основном, с минералами железа (феррибиотитом, анкеритом, гематитом, иногда пиритом) в составе продуктивных ассоциаций, которые развиваются по альбититам и отделяются от них локальными проявлениями хрупких деформаций.

Изотопный возраст альбититовых месторождений по данным Д.Н. Щербака [3] составляет 1835–1750 млн лет. Важно отметить, что богатое комплексное V-U оруденение рудопроявления Обгонного (северный фланг Мичуринского поля) тем же автором датировано как 350 млн лет, что может свидетельствовать о неоднократной постальбититовой регенерации вещества, включая уран и его спутники.

Древняя (мезозойская) кора выветривания в этой части щита имеет хорошо развитое трехчленное строение [3, 5, 16] с выделением в вертикальном профиле (сверху вниз) зон полной каолинизации или каолиновой; частичной каолинизации или гидрослюдисто-каолиновой и начального выщелачивания или дезинтеграции. Размытая поверхность коры перекрыта песчано-глинистыми, с обилием углефицированных растительных остатков, отложениями бучакской свиты среднего эоцена (речные фации) и более молодыми неоген-четвертичными осадками. Общая мощность мезо-кайнозойских отложений меняется в широких пределах, например, в районе Новоконстантиновского месторождения составляет 20–120 м, при мощности четвертичных суглинков 5–8 м.

Кора выветривания альбититовых месторождений имеет свою специфику, но, как правило, с сохранением указанного строения. Так, на Мичуринском месторождении она маломощна (не более 5–10 м), а эрозионные окна в перекрывающих ее бучакских терригенно-углистых отложениях способствовали проникновению кислородсодержащих вод, и соответственно окислению, на значительные глубины. Наиболее детально процессы гипергенеза изучены на Новоконстантиновском месторождении [3, 12]. Каолиновая зона здесь имеет мощность 5–7 м; на границе ее с бучакским горизонтом отчетливо проявлена вторичная сульфидизация с замещением углистого материала дисульфидами Fe (содержание S достигает 18%). Гидрослюдистая зона мощностью 8–9 м фиксируется постепенной сменой каолинита монтмориллонитом, но специфической особенностью этой зоны является присутствие сидерита (CO_2 0,6–0,8%). Важно отметить также примесь

минералов Fe и S в разных формах: пирит, марказит, магнетит, мартит, вюстит, радиобарит. Зона дезинтеграции мощностью 1–13 м с горизонтом структурного элювия в основании представлена измененными альбититами, в составе которых, наряду с реликтами исходных породообразующих и акцессорных минералов, а также новообразованных каолинита и монтмориллонита, встречаются всё те же сидерит, радиобарит, пирит, вюстит, магнетит. Нижняя зона постепенно переходит в трещиноватые альбититы с сохранением щелочных темноцветных минералов, а также с хлоритом, гидрослюдой, монтмориллонитом, сидеритом, которые могут распространяться на значительные глубины — до 200 м и более.

Окислительно-восстановительные условия гипергенного минералообразования на изученном месторождении неоднократно менялись. Профиль допалеогеновой коры выветривания, вероятно, имел типичный окислительный характер. Вследствие перекрытия коры терригенно-углистыми отложениями среднего эоцена обстановка изменилась на восстановительную, по всему ее профилю сформировались соответствующие ассоциации, включая минералы Fe²⁺: дисульфиды, карбонаты и оксиды. Последующее изменение базиса эрозии с выведением верхнего уровня коры в зону циркуляции грунтовых вод способствовало наложению на восстановленные породы более молодого (четвертичного) окисления, что подтверждается находками сульфатов (гипса, радиобарита, англезита), фосфатов, ванадатов, гидроокислов железа. Интерес в этой связи представляет заключение И.Г. Минеевой, изучавшей зону гипергенеза альбититовых месторождений [3]: если предположить, что весь свинец во вторичных минералах урана радиогенный, то приблизительный расчет возраста уранильной минерализации дает значение не древнее олигоцена.

Современные ландшафтно-геохимические условия района ураноносных альбититов определяются их расположением в зоне перехода между лесостепью и степью с проявлением нейтральной окислительной гидрокарбонатно-кальциево-магниево- и нейтральной окислительной сульфатно-кальциево-натриевой геохимических обстановок соответственно [13].

Уран в альбититах и зоне их гипергенеза

Содержание урана в рудной массе. На изученных месторождениях альбититовой формации уран ведет себя, в общем, одинаково (табл. 1).

Таблица 1. Среднее содержание урана (г/т) в урановых рудах и вмещающих породах альбититовых месторождений Украинского щита (в скобках приведены вариации)

Месторождение	Вмещающие породы	Альбититы безрудные	Непромышленные руды	Промышленные руды
Севериновское	6,4 (1–22)	13,0 (1–57)	197,7 (101–288)	2409,6 (341–11128)
Мичуринское	10,0 (5–15)	20,3 (7–52)	80,3 (20–180)	835,0 (325–1670)
Северо-Коноплянское	9,2 (1–27)	15,6 (1–48)	138,8 (57–258)	1060,5 (350–2041)
Юрьевское	14,2 (1–40)	25,1 (7–57)	90,1 (37–167)	1092,0 (355–3506)
Ватутинское	15,9 (3–53)	17,9 (5–65)	142,2 (52–293)	2060,4 (377–5140)
Новоконстантиновское	4,8 (0,5–14)	20,8 (0,4–56)	151,0 (51–248)	1449,4 (568–4470)

Примечание. Содержание урана приведено: для Мичуринского и Новоконстантиновского месторождений — по результатам опробования ГПП «Кировгеология» с использованием материалов В.Ф. Лапусты; для остальных месторождений — по данным Ю.А. Фомина.

Во вмещающих породах, куда отнесены гнейсы, мигматиты и граниты, как неизменные, так и микроклинизированные и окварцованные, а также диафториты, количество урана варьирует от первых г/т до 40–53 г/т; такие содержания зачастую уже на порядок и более превышают фоновые для пород метатерригенной формации Украинского щита [1]. В альбитизированных породах и безрудных альбититах внешних частей рудных

зон содержание урана в среднем по объектам возрастает в 1,3–4,3 раза (максимально для Новокоптяновского месторождения). В качестве границы между оруденелыми и рудными альбититами (бортовое содержание) принята концентрация урана в 300 г/т. Наиболее высокими его содержаниями (в среднем по объектам 0,08–0,24; в отдельных образцах до 0,5–1,11%) характеризуются альбититы с наложенными продуктивными минеральными ассоциациями, включая феррибитит, анкерит, гематит и минералы U. Контрастность руд (соотношение средних содержаний урана в рудах и вмещающих породах) по нашим данным изменяется от 77–84 (Юрьевка и Мичуринка) до 115–130 (Северо-Коноплянка и Ватутинка), достигая 302–376 (Новокоптяновка и Севериновка). Согласно расчетам Ю.П. Егорова [7], по степени концентрации урана (К.к. U = 72) руды Мичуринского месторождения относятся к числу рядовых. Можно предположить, таким образом, что альбититы с непромышленным содержанием урана (20–300 г/т) окажутся в отвалах со всеми вытекающими экологическими последствиями.

Особо следует подчеркнуть наличие в рудных зонах регенерированных локальных проявлений урана и сопутствующих элементов, не связанных с альбититами (рудное проявление Обгонное). В Bi-U рудах этого проявления содержание U в тектонической глинке достигает ураганного — около 15,5%, в полосе 10–20 см от рудной жилы количество U составляет 0,03–0,05% [1], т.е. соизмеримо с промышленным.

Рассмотрение элементов-спутников урана выходит за рамки этой статьи, отметим лишь высокие (вплоть до промышленных значений) концентрации в альбититах Th, Pb, V, Be, Ni, Mo, Zr, Ba, Sr, Zn, а также (в некоторых объектах) Au, Ag и Bi [20].

Формы нахождения урана в рудной массе. В соответствии с существующими представлениями [17] можно выделить уран в форме собственно урановых (первичных и вторичных) и высокорadioактивных акцессорных минералов, рассеянный в пороодо- и рудообразующих минералах, а также мобилизованный вторичными процессами.

Собственно урановые минералы. В рудах большинства месторождений основная масса урана связана с браннеритом и уранинитом разной степени изменения и разного состава [3, 6, 7]. Первичная природа браннерита, как будто, сомнений не вызывает, но если на Ватутинском месторождении его состав близок к стехиометрическому (TiO_2 29,5–33,0%), то на Новокоптяновском, Мичуринском и особенно Севериновском месторождениях содержание TiO_2 в нем повышенное (33,4–38,3%). Это, по мнению авторов [3], может быть связано с развитием оксидов титана при разрушении минерала, что подтверждается, в частности, тем, что на Севериновском месторождении браннерит часто образует тонкокристаллические агрегаты в ассоциации с оксидом урана (настураном). Из других компонентов в браннерите всех объектов установлено повышенное содержание PbO (1,6–11,2%) и CaO (0,3–14,0%).

Уранинит в рудах Ватутинского и Новокоптяновского месторождений также содержит Pb (PbO 17,4–20,5%). На Севериновском месторождении он (часто в ассоциации с гематитом) представлен кальциевой бессвинцовой разновидностью (CaO 11,5–11,6%; PbO 1,2–2,8%) и, согласно И.Г. Минеевой [3], является продуктом постальбититового восстановительного эпигенеза. Характеризуя Новокоптяновское месторождение, Ф.И. Ракович (1985) отдает приоритет именно ураниниту, выделяя, как минимум, две его генерации: раннюю в виде идиоморфных кристаллов в связи с альбитом, апатитом, цирконом и более позднюю (и главную) в виде вкрапленности и гнездообразных выделений в сростании с карбонатами, альбитом, эгирином, сфеном, флогопитом. Подчеркивая близкое во времени формирование основной массы уранинита и браннерита, она отмечает также обычное для рудных зон замещение уранинита уранатами, силикатами и гидроокислами уранила. На Мичуринском месторождении уранинит не установлен; предполагается, что он замещен настураном, который, в свою очередь, в условиях зоны окисления легко переходит в гидронастуран. Отметим присутствие настурана и на других объектах.

Особо следует сказать о ненадкевите, который описан в составе руд Мичуринского, Северо-Коноплянского и Ватутинского месторождений как первичный силикат U с существенной примесью Ti. Детальные исследования [9] показали, однако, что

«ненадкевит» является смесью нескольких фаз — оксидов и силикатов U^{6+} , включая гидронастуран, ургит, коффинит, болтвудит-казолит, реликтовый уранинит, а также анатаз, рутил, малакон, гематит, галенит и самородный свинец. Предполагается [3], что это продукт «древнего окисления браннерита, не только неоднократно замещенного гидроксидами шестивалентного урана, но и испытавшего воздействие древних восстановительных процессов». Нет единого мнения и по поводу другого силиката урана — коффинита, присутствующего на всех объектах. На Мичуринском месторождении коффинит считают самостоятельным гипогенным минералом, образовавшимся одновременно с ненадкевитом и браннеритом (в ассоциации с флогопитом, гидробиотитом, эпидотом) и предшествующим ураниниту. На Новоконстантиновском месторождении, как отмечалось выше, коффинит вместе с другими вторичными минералами урана замещает уранинит. Весьма показательным является тот факт, что уранинит и коффинит являются главными минералами переотложенных руд молодого проявления Обгонного.

Типично гипергенные минералы U представлены на альбититовых месторождениях весьма широко и разнообразно: окислы и гидроокислы (урановая чернь, гидронастуран, ургит, маскуит, ураносферит, фурмарьерит); силикаты (уранофан, болтвудит, казолит, бетауранотил); фосфаты (нингиоит, отенит, дюмонтит, парсонсит, фосфуранилит); ванадаты (карнотит, тюямунит, сенджерит, франсвиллит).

В заключение подчеркнем два существенных момента. Во-первых, на всех изученных месторождениях проявлена как первичная, так и вторичная урановая минерализация. Во-вторых, одни и те же минералы образуют разные генерации в составе новообразованных и регенерированных минеральных ассоциаций.

Высокорadioактивные акцессорные минералы. На всех месторождениях развиты циркон, циртолит, монацит, сфен, апатит, распространен также U-содержащий ильменит (давидит), эпизодически отмечаются ортит, ксенотим, торит.

Для Новоконстантиновского месторождения особенно характерны циркон, аршиновит, малакон. Уран в этих минералах в количестве от десятков и первых сотен г/т до первых % (коэффициент концентрации 10–100) изоморфно замещает Zr, Y, Th, т.е. входит в кристаллическую решетку. Считается, что он прочно удерживается в решетке при разрушении минералов. Вместе с тем, исследованиями М.С. Ходоровского [3], показана возможность перераспределения этих элементов, в частности урана, в «сквозных» акцессориях с возможным нарушением кристаллической решетки минералов и частичным переходом их в растворенное состояние. Сравнение реликтовых и новообразованных генераций апатита и циркона демонстрирует различную тенденцию (табл. 2): в апатитах содержание урана возрастает от реликтовых генераций в гранитах к новообразованным в альбититах; в цирконах, сингенетичных альбититам, наоборот, оно снижается.

Наибольшие концентрации монацита установлены в новоукраинских гранитах Новоконстантиновского месторождения, а также в исходных породах и альбититах Юрьевского и Ватутинского месторождений. Поведение урана в монаците метасоматической колонки, на примере Новоконстантиновского месторождения [3], аналогично таковому в цирконе; в генерациях альбититов промежуточных и внутренних зон концентрация элемента существенно ниже, чем в монацитах ощелоченных гранитов внешних зон. Перераспределение, по мнению авторов, могло происходить между генерациями акцессорных минералов, либо даже приводить к интенсивному формированию собственно минералов U, например, на границах участков с поздними (постальбитовыми) карбонатами и слюдами, играющими роль физико-химических барьеров.

Давидит описан в составе руд Мичуринского и Ватутинского месторождений [3, 7]. Обычно он рассматривается как первичный минерал урана, хотя содержание элемента в нем относительно невысокое, во всяком случае, для собственно урановых минералов (UO_2 7,1–12,3%). Зато он характеризуется наиболее высокой концентрацией титана (TiO_2 49,1–53,7%) и железа (Fe_2O_3 26,6–30,3%), а также повышенным количеством свинца (PbO 3,3–5,6%).

Таблица 2. Содержание урана в акцессорных минералах щелочных метасоматитов Ново-константиновского месторождения (по М.С. Ходоровскому и др. [3])

Апатит		Циркон		Моноцит		
1	2	1	2	1	2	3
6–40	30–70	350–2000	120–1200	0,79–1,40	0,19–0,31	0,36

Примечание. Концентрации U определялись: в апатите и цирконе (г/т) с помощью рентгенофлюоресцентной установки АРФ-6; в моноците (UO₂, %) рентгеноспектральным методом. Апатит, циркон: 1 — реликтовый (сингенетичный гранитам); 2 — новообразованный (сингенетичный альбититам). Моноцит: 1 — в альбитизированных гранитах и альбит-микроклиновых метасоматитах внешних зон; 2 — в рибекит-эпидотовых альбититах промежуточных зон; 3 — в пироксен-гранатовых альбититах внутренних зон.

Уран, рассеянный в породообразующих и некоторых акцессорных минералах. В плагиоклазах, микроклине, кварце, как показали многочисленные, в том числе наши, исследования [17, 19], уран присутствует в форме относительно равномерного, в той или иной степени диспергированного (атомарного, по В.И. Вернадскому, или молекулярного) рассеяния. Что касается биотита, амфиболов и пироксенов, то, по крайней мере, для части U в этих минералах предполагается сорбционная форма; в биотите, кроме того, возможны тонкие включения акцессориев и различные варианты изоморфизма. Наиболее простым объяснением повышенного количества U в магнетите и гематите является предположение о механическом захвате его атомов. Эти формы вхождения U в минералы могут иметь существенное значение, исходя из значительных объемов вмещающих («пустых») пород, не менее половины всего его количества, из них 15–25% — это U вполне подвижный [19].

Уран, мобилизованный вторичными процессами. Во-первых, сюда следует отнести так называемый «сорбированный» (легкоподвижный) уран, присущий всем урановым месторождениям. В частности, широким распространением пользуются сорбционные накопления урана на Мичуринском и Ново-константиновском месторождениях, где они связаны с гидроокислами железа (гематитом, гидрогетитом, гидрогематитом), цоизитом, гидробиотитом, лейкоксеном, хлоритом и гидрослюдами (вероятно и с карбонатами) [7, 12]. Весьма характерны сорбционные образования урана и в связи с сульфидной минерализацией — спиритом [17]. Наши исследования с помощью трековой *f*-радиографии подтвердили этот вывод также для альбититов в вмещающих породах Севериновского и Ватутинского месторождений. Во-вторых, очень важно обратить внимание на участки проявления преальбититовых хрупких деформаций и диафтореза с замещением исходных минералов новообразованиями хлорита, эпидота, клиноцоизита, кальцита, гематита, лейкоксена с учетом следующих обстоятельств: 1) такие образования широко развиты на всех изученных месторождениях ураноносных альбититов, где играют роль структурно-литологической основы; 2) будучи безрудными, диафториты, тем не менее, часто содержат уран в повышенных количествах — первые десятки г/т, причем уран таких зон характеризуется увеличением доли подвижных форм [20].

В целом сорбционная форма урана с высокой миграционной способностью характерна для вторичных минералов во всех блоках пород, подлежащих эксплуатационной выемке, с учетом вмещающих пород, диафторитов и альбититов (безрудных, слаборудных и рудных). В гипергенных условиях уран в такой форме может легче всего переходить в подвижное состояние, становясь источником загрязнения подземных и поверхностных вод и почв, прежде всего, в участках, прилегающих к отвалам и горным выработкам. Но он может извлекаться, увеличивая полезный выход рудного урана, например, при использовании технологий выщелачивания, а также, на путях миграции, формировать поверхностные рудные концентрации, вплоть до промышленных месторождений.

Поведение урана в процессах выветривания. Наиболее детально процессы гипергенеза урановорудных альбититов описаны И.Г. Минеевой [3, 12] для Ново-константиновского и Мичуринского месторождений, но, как видно из приведенных выше материалов по формам нахождения урана, они проявлены на всех объектах. Например, в пределах

Мичуринского месторождения первичных руд в чистом виде, без следов окисления, не встречено, хотя в приповерхностных частях рудных залежей вполне могут присутствовать первичные минералы [7]. Ниже приведена краткая характеристика различных по морфологии, времени и условиям формирования проявлений зоны гипергенеза, в основном на примере названных месторождений.

Древняя (мезозойская) составляющая (кора выветривания) в изученных участках имеет трехчленное строение. Верхняя часть может сохранять реликты приповерхностных зон уранового обогащения, но обычно интенсивно преобразована поздними (неоген-четвертичными) процессами окисления и выщелачивания с замещением браннерита и продуктов его разложения гидроокислами Fe. Промежуточная часть характерна для всех альбититовых месторождений и представлена гидроксидно-силикатными урановыми рудами. Браннерит, уранинит и настуран по краям рудных тел замещаются вторичными минералами: браннерит — смесями оксидов (гидроксидов) U^{6+} , Pb, Ti (анатаз) и опала, вторичного уранинита, кварца, гематита, галенита; уранинит и настуран при дальнейшем окислении гидратируются с образованием гидронастурана и ургита. В нижней части по гидроксидам U развиваются силикаты уранила — бета-уранотил либо уранофан. Согласно экспериментальным данным И.Г. Жильцовой и др. [3], все гидроксиды U, бета-уранотил и уранофан максимально устойчивы в растворах с pH 5–7, но уранофан может быть также устойчивым и в щелочных средах, более характерных для больших глубин. Вообще же урановые минералы, относимые к зоне гипергенеза, описаны на глубинах до 1000–3500 м.

Участки (послесреднеэоценового) приповерхностного уранового обогащения в коре выветривания сохранились на единичных объектах. В пределах Новокоптяковского месторождения отмечаются два уровня концентрации U. Верхний уровень с настуран-коффинитовыми рудами (U 0,2–0,4%) расположен в подошве углистых отложений палеогена над зоной сульфидного обогащения. Нижний уровень с менее богатыми нингиоит-настуран-коффинитовыми рудами расположен в подошве коры выветривания, на выщелоченных альбититах, в участках, сложенных сидеритом и монтмориллонитом.

Типоморфными минералами здесь являются оксиды, силикаты и фосфаты U^{4+} (настуран, коффинит и нингиоит); оксиды и карбонаты Fe^{2+} (магнетит, вюстит, якобит и сидерит); сульфиды (пирит, марказит, галенит); самородные элементы (медь, висмут, золото); оксиды Zr (тажеранит) и глинистые минералы (каолинит, монтмориллонит, гидрослюда). Реликтовые минералы представлены браннеритом, цирконом, ильменитом, кварцем, полевыми шпатами, хлоритом. Такой комплекс минералов в сочетании с органическим гумусовым веществом, свидетельствует о проявлении интенсивного восстановительного эпигенеза, связанного с углеродсодержащими отложениями палеогена. Этот вывод, по мнению И.Г. Минеевой, подтверждается находками нингиоита и вюстита. Для образования нингиоита, в частности, требуются условия, сочетающие восстановительную обстановку и кислую среду, и возникающие только при наличии органического вещества и сульфидов. Парагенезис нингиоита с марказитом свидетельствует о достаточно кислой среде, сильным восстановителем служит углефицированное растительное вещество. В состав этого минерала входят также P и TR, их поставляют (при выветривании) альбититы с содержанием P до 0,3–0,45%, за счет апатита и монацита, т.е. эти аксессуарные минералы вполне подвергаются разрушению. Вюстит в сростании с якобитом образовался при разрушении магнетита также в восстановительных условиях.

Неоген-четвертичные зоны окисления проявлены на всех месторождениях ураноносных альбититов, хотя и имеют специфику в зависимости от строения и состава последних. Наиболее полно они изучены на Мичуринском месторождении [3] в пределах открытой пологозалегающей рудной залежи на небольшой (60 м) глубине. Окислению с формированием силикатно-слюдковой минерализации подверглись руды участка приповерхностного уранового обогащения с сульфидами и органическим веществом типа описанных выше. Молодая зона окисления содержит фосфаты, ванадаты, силикаты и оксиды U^{6+} , а также ванадинит, гидроокислы Fe^{3+} (гидрогетит, гетит), сульфаты (гипс, радиобарит, англезит по галениту) и глинистые минералы (каолинит, гидрослюда).

Реликты раннего восстановительного эпигенеза представлены оксидами и силикатами U^{4+} (настуран и коффинит), сульфидами (пирит, марказит), а также органическим веществом. Доля сульфидов относительно урановых минералов довольно высока. Формирование зоны окисления начинается отложением вторичных фосфатов — растворы повышенной кислотности активно воздействуют на ранние фосфаты (апатит и нингиоит) с последующим осаждением U (вместе с P) в окисленной форме. При повышении pH до 7,0–8,5 вслед за фосфатами в пустотах выщелачивания альбититов отлагаются ванадаты, которые, в свою очередь, замещаются силикатами уранила.

Характерной чертой приповерхностных руд является смешение парагенезисов урановых минералов всех зон на одном уровне (телескопирование), что может свидетельствовать о быстром и недавнем перемещении уровня грунтовых вод как препятствии формированию хорошо проработанной зоны окисления. Полного окисления в приповерхностной зоне нет; наряду с типичными представителями зоны окисления, наблюдаются минералы-индикаторы предшествующих процессов восстановительного эпигенеза. Восстановление урана в связи с сероводородными и карбонатными барьерами (в верхней и нижней частях коры соответственно), по-видимому, происходило на всех месторождениях альбититов. Следствием же воздействия неоген-четвертичных процессов окисления и эрозии зачастую было разрушение углистых отложений среднего эоцена и зоны уранового обогащения.

Преобразование минерального состава урановых руд в гипергенных условиях, согласно И.Г. Минеевой [12], хорошо увязывается с зональным распределением в разрезе рудных залежей (по вертикали) U, Ra и ^{206}Pb . В приповерхностной части рудных тел в зависимости от сохранности отложений среднего эоцена (бучакский горизонт) может проявиться восстановительный эпигенез, приводящий к обогащению пород ураном ($U > Ra$, в единицах активности), или окислительный с выносом урана ($U < Ra$). Преобладает вынос U, отношение Ra/U сдвинуто в пользу Ra (>2). Радиогенная добавка $^{206}Pb > 50$ г/т. Глубже (на уровне альбититов фундамента) устанавливается равновесное, или близкое к равновесному, соотношение радиоэлементов ($Ra/U \sim 1$). Радиогенная добавка свинца может иметь положительное или отрицательное значение; возможен как вынос, так и привнос урана. С увеличением глубины отношение Ra/U постепенно сдвигается в пользу U (от 1 до 0,85–0,77); радиогенная добавка свинца характеризуется высокими отрицательными значениями (^{206}Pb от -94 до -800 г/т). Автор связывает это изменение с увеличением концентрации урана с глубиной за счет привноса его с верхних уровней месторождения. Увеличение его содержания при этом не компенсируется радиогенным свинцом.

В качестве примера неравномерного распределения U и радиогенного Pb в урановорудных альбититах, связанного с нарушением равновесия между этими элементами, приводим фрагмент разреза Мичуринского месторождения (табл. 3). Жирным шрифтом выделены промышленные руды. Таблица демонстрирует присутствие в разрезе рудной зоны альбититов с равновесными и нарушенными U-Pb соотношениями. При этом отмечаются сближенные участки с дефицитом как U (207–209 м), так и Pb (199–200 м), что свидетельствует о перераспределении в зоне рудного вещества в постальбититовое время.

Таблица 3. Распределение U, Th, Pb и его изотопов в альбититах рудной зоны Мичуринского месторождения (скв. 593, данные опробования ГГП «Кировгеология»)

Глубина, м	Pb^{206}	Pb^{207}	Pb^{208}	Pb^{204}	U	Th	Pb
	%				г/т		
48–72	27,6–30,1	19,8–21,2	47,3–51,6	1,0–1,4	7–12	0,8–1,4	15–28
72–95	32,5–41,0	17,6–20,1	40,0–46,4	1,0–1,4	21–28	1,3–2,0	16–32
101–106	66,6	13,4	19,4	0,6	80	0,9	34
110–111	44,0	17,3	37,7	1,0	22	1,1	15

Глубина, м	Pb ²⁰⁶	Pb ²⁰⁷	Pb ²⁰⁸	Pb ²⁰⁴	U	Th	Pb
	%				г/т		
111–113	83,3	10,6	5,9	0,2	89	1,2	177
113–117	61,7–62,0	14,5–14,7	22,7–23,2	0,6	61–62	1,0–1,6	21–24
119–120	80,8	9,7	9,3	0,2	360	3,8	94
120–122	85,1	9,8	4,9	0,2	890	2,8	180
139–154	31,8	20,2	46,7	1,3	18	1,6	24
161–169	45,2–46,3	16,9–18,2	34,3–36,8	1,1–1,2	16–48	1,5–1,8	7–28
169–174	33,4	19,3	46,1	1,2	12	1,7	14
183–188	34,3	15,1	49,7	0,9	52	0,7	13
191–193	87,0–87,2	9,4–10,3	2,6–3,3	0,1	1490–1670	2,8–3,8	240–575
195–197	76,5–86,4	8,5–11,6	4,9–11,2	0,2–0,7	710–840	1,7–4,3	129–139
199–200	82,1	9,7	7,6	0,6	325	2,0	49
200–202	79,0–82,3	10,7–11,9	6,4–8,6	0,5–0,6	480–750	2,1–2,4	158–191
204–207	73,4	10,1	16,1	0,4	180	1,5	30
207–208	76,2	11,1	12,2	0,5	42	1,3	810
208–209	78,1	11,6	9,9	0,4	20	2,0	194
209–210	73,9	11,2	14,3	0,6	140	2,0	31
211–217	43,8–52,0	16,4–17,9	30,9–37,3	0,7–1,0	17–29	1,0–2,2	6–30
223–225	63,6	13,2	22,4	0,8	97	1,4	23
227–229	60,6	13,2	25,3	0,9	32	1,0	6
256–258	40,0	18,6	40,3	1,1	16	1,0	5
261–289	33,4–36,8	17,8–19,4	42,7–47,6	1,1–1,2	7–10	0,5–1,7	5
290–297	29,6	19,5	49,5	1,4	13	1,6	11

Примечание: жирным шрифтом выделены образцы кондиционных урановых руд.

С учетом взаимосвязи U и CO₂, как важнейшего геохимического фактора гидротермального урановорудного процесса [14], перераспределение урана в условиях гипергенеза И.Г. Минеева также связывает с карбонатной системой. Отмечая цикличность процессов концентрации и выщелачивания урана, как и функционирования буферной карбонатной системы, влияющей на подвижность, перенос, осаждение, растворение и переотложение элемента, автор предполагает проявление своеобразного круговорота или цикла урана, который проявлялся неоднократно, начиная с протерозоя, и, вероятно, связан с закономерным поднятием щита и снижением уровня грунтовых вод. «Наблюдаемые в настоящее время концентрации урана и сопутствующих компонентов... неоднократно преобразованы и продолжают преобразовываться, способствуя формированию (новых) рудных залежей».

Это подтверждается тем, что на Украинском щите установлено несколько эпох корообразования, начиная с позднего протерозоя, чему способствовали относительно стабильный тектонический режим, палеогеографические условия, а также сводовая структура центральной части щита. Последующие многоэтапные эрозионные процессы этого свода препятствовали накоплению мощных толщ элювия, и в настоящее время кристаллическое основание перекрывают главным образом мезозойские коры, а реликты остаточных кор более древнего возраста сохранились лишь на склонах щита и в некоторых депрессионных структурах. В центральной части щита, помимо площадных кор выветривания, распространены линейные коры, сформированные в зонах тектонических нарушений, благоприятных для циркуляции и глубокого проникновения поверхностных вод.

Характер распределения U в коре выветривания чудново-бердичевских гранитов и мигматитов юго-западной части Украинского щита [5], не только дает представление

о поведении его в коре в аналогичных условиях, но и позволяют оценить количественную сторону его миграции. По данным упомянутых авторов, для верхней зоны коры характерны окислительные слабокислые ($\text{pH} = 6,0\text{--}6,5$) условия; для нижних, начиная с низов гидрослюдисто-каолиновой зоны, которая часто совпадает с зеркалом трещинных вод, более восстановительные щелочные ($\text{pH} = 7,5\text{--}8,0$). Поведение урана, как и других элементов с переменной валентностью (Mn, Mo, V, Be), характеризуется сходными чертами: выносом из зоны окисления и относительным временным накоплением на восстановительном барьере в промежуточных зонах. Наши расчеты (табл. 4) показывают, что при этом U во всех зонах ведет себя, как элемент подвижный, склонный к рассеянию, по величине коэффициента геохимической подвижности он, действительно, близок к Mn, Ni, Co, Cr, V, Mo, а также Ba [16]. Доля вынесенного из разных зон урана составляет 25–42% (0,11–0,19 г/м³), будучи в абсолютном выражении максимальной в каолиновой зоне, хотя динамика выноса, скорее всего, от нижней зоны к верхней изменялась. Характер геохимических показателей, а также соотношение вынесенного урана определяется также частичным (временным) осаждением элемента в нижних зонах коры на фоне общего выноса.

Таблица 4. Поведение урана в коре выветривания гранитов Украинского щита (в основу расчетов положены данные Ю.Г. Герасимова и др. [5])

Зоны коры выветривания	Объемный вес, г/см ³	Содержание U, 10 ⁻⁴ %	Kк	Ki	Вынесенный U, г/м ³	Вынесенный U, %
1	1,58	0,07	0,58	2,37	0,19	41,7
2	1,81	0,09	0,75	1,89	0,14	25,0
3	2,35	0,08	0,67	1,75	0,11	33,3
4	2,50	0,12	1	1	—	—

Примечание. Зоны коры выветривания: 1 — каолиновая; 2 — гидрослюдисто-каолиновая; 3 — дезинтеграции; 4 — материнских пород. Kк — коэффициент концентрации или отношение среднего содержания элемента в той или иной зоне коры выветривания к среднему содержанию этого элемента в исходных кристаллических породах; Ki — коэффициент геохимической подвижности элемента относительно Ti, согласно [16].

Степень насыщенности глинистых минералов ураном различна, как различны и формы вхождения элемента в эти минералы [23]. Основное количество малоподвижного (катионного по В.В. Щербине) U содержится в каолинитах и каолинизированных гидрослюдах с pH среды 5,0–6,5. Подвижный (анионный) U концентрируется гидрослюдами и галлуазитами, которые развиваются в условиях слабощелочной и близкой к нейтральной среде с pH 6,0–9,0. Адсорбция соединений (гидроокислов) урана гидроокислами железа определяется знаком заряда последних [24]. Если гидроокись железа заряжена положительно, она активно осаждает электроотрицательные гидроокислы U⁶⁺ и Mn⁴⁺. Если же гидроокись железа на поверхности имеет преобладающие OH⁻ анионы, т.е. коллоидная частица гидроокиси Fe несет отрицательный заряд, такие лимониты уран не содержат.

Поведение U в водах. Проведенное Ю.Н. Демиховым и Н.А. Викторовой (июль 1978) опробование водных источников (самоизливающихся скважин, колодцев, родников и малых водотоков) района Кировограда (северная степная зона), показало, что 19 источников из 31 характеризуются гидрокарбонатным либо гидрокарбонатно-сульфатным составом вод (в одном колодце вода определена как гидрокарбонатно-хлоридная). Воде остальных 12 источников присущ сульфатный, хлоридный или смешанный состав. Из катионов преобладающим развитием пользуется Ca (17 источников), менее характерен Na (10), Mg установлен только в 4 (в 3 из них воды хлоридные). Эти материалы подтверждают проявленность в этом районе черт как лесостепного, так и степного ландшафтов [13]. Значения pH вод лесостепной и степной зон (в границах, показанных Б.Ф. Мицкевичем) определены Ю.Н. Демиховым для 89 проб в пределах 5,0–8,0. В среднем pH вод степного ландшафта несколько выше по сравнению с лесостепью: 6,6 по 42 источникам и 6,1 по

47 источникам соответственно. Щелочные воды с рН 7,5–8 установлены в реках Южный Буг, Черный Ташлык, Ингулец и ряде колодцев по южному (более засушливому) обрамлению урановорудного района, а также вблизи Ватутинского месторождения, всего 8 источников.

Содержание дейтерия, судя по измерениям δD воды 167 источников района, меняется в очень широком диапазоне (-101...-54, в среднем -82,7‰). Установленная тенденция облегчения воды по дейтерию в ряду поверхностные водотоки – колодцы глубиной 2–35 м – скважины глубиной до 350 м может быть объяснена двумя эффектами: испарением части влаги на поверхности и/или запаздывающим водообменом на глубине. То и другое следует учитывать при гидрогеохимическом мониторинге района. Важно отметить отличие щелочных вод по изотопному составу водорода. Так, среднее значение $\delta D H_2O$ (‰) указанных 8 источников с рН 7,5–8 равно -74,7 (-88...-62). Нейтральные и кислые воды (рН 5–7) остальных 78 источников характеризуются в среднем более легкой (по водороду) водой: -82,6 (-101...-54); разница между нейтральными (6–7) и кислыми (4,5–5) водами не существенна.

Интерес представляет изотопное сравнение современных вод с водой флюидных включений урановорудных альбититов (например Ново-Константиновского месторождения [22]), которое демонстрирует значительную эволюцию последней в сторону усиления ее метеорности. Значения $\delta^{18}O$ изменяются в пределах: от +2,8...-2,6 до -12,0...-25,2‰ при значениях δD -90...-40‰. Температура гомогенизации включений в минералах альбититов при этом существенно снижается: от 420–350 до 116–53° С. Тем самым, возможно, подтверждается общая тенденция эволюции урановых систем с усилением гипергенных факторов. Иными словами, вода, которая (в составе флюида) участвовала в формировании ураноносных альбититов, затем становится одним из основных факторов их разрушения.

Концентрация U в подземных и поверхностных водах окрестностей Кировограда, по данным тех же исследователей, варьируется в пределах $1-34 \cdot 10^{-6}$ г/л с двумя исключениями. В пробе из водотока в верховьях р. Ингул (с. Подгайцы) количество U снижается до 0,6; в пробе из скв. 1016 (г. Кировоград) оно повышается до 228 ($2,28 \cdot 10^{-4}$ г/л). Полученные результаты соответствуют сведениям о фоновой радиоактивности трещинных вод Украинского щита, опубликованным ранее А.Б. Туктаровой [7], согласно которым содержание урана (10^{-6} г/л) повышается от 1–5 в Полесье до 10–50 в центральной части щита и далее до 50–100 в Среднем Приднепровье и Приазовье. Основные факторы, определяющие такую закономерность, это условия питания подземных вод (снижение количества атмосферных осадков и увеличение испарения) и изменение их состава (от гидрокарбонатно-кальциевого с общей минерализацией 0,1–0,5 г/л через сульфатно-гидрокарбонатный с минерализацией 1–2 г/л до хлоридно-сульфатного с минерализацией 2–5 г/л). При этом отмечается отсутствие четкой количественной зависимости содержания урана в водах от таковых в породах. Тем не менее, судя по отдельным графикам А.Б. Туктаровой, на наш взгляд, можно говорить об отчетливом повышении количества U в водах, связанных с графит-содержащими гнейсами центральной части щита (в районе урановых месторождений) по сравнению с Полесьем и Приднепровьем. Весьма слабо, но проявлено увеличение содержания U и в водах мигматизированных серых гранитов, а также кировоград-житомирских гранитов этого района.

Важнейшей гидрогеологической особенностью района урановорудных альбититов является формирование грунтовых вод в пределах главного водораздела систем рек Днепр – Южный Буг с питанием водоносных горизонтов палеогена водами четвертичных (плиоценовых) песчано-глинистых отложений. Содержание U в водах четвертичных отложений степной ландшафтной зоны достаточно высокое (в среднем $12 \cdot 10^{-6}$ г/л, данные В.А. Шумлянського, Е.Г. Суцук и др. [3]). В трещинных водах количество урана увеличивается по мере продвижения вод от водораздельных участков ($10 \cdot 10^{-6}$) к областям транзита и местам разгрузки ($30 \cdot 10^{-6}$ г/л). В участках развития коры выветривания, особенно по породам с повышенным содержанием урана, концентрация его в трещинных водах повышается в среднем до $70 \cdot 10^{-6}$, достигая $(150-300) \cdot 10^{-6}$ г/л; т.е. возрастает в 6–25 раз по сравнению с содержанием в водах четвертичных отложений.

Исследование форм нахождения урана в пластовых водах с рН 5,8–8,36, Eh от -0,07 до +0,5 в и общей минерализацией 0,6–3,7%, при температуре от 0 до 30° С, циркулирующих среди гранитов, известняков и терригенных осадочных пород, свидетельствует, что в обычных слабокислых, нейтральных и слабощелочных подземных водах разного характера минерализации преобладают анионные формы нахождения урана в виде ди- и трикарбонатуранила $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2^{2-}]$ и $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}]$ [11]. Количественно такие комплексы составляют от 84 до 100%; в песках и гранитах заметную роль (9–16%) может играть гидроксокомплексное соединение $[\text{UO}_2\text{OH}^+]$; в других примерах количество его ничтожно (0–5%). Концентрации сульфатных и хлоридных комплексных ионов в таких водах не имеют заметного значения — их можно не учитывать даже в сульфатных и хлоридных водах.

Осаждение урана из пластовых вод происходит при разрушении уранилкарбонатных комплексов в результате окислительно-восстановительных реакций. Величина Eh начала осаждения колеблется от 0 до -0,2 в зависимости от концентрации урана в растворе, величины и характера общей минерализации воды, а также от величины рН и концентрации HCO_3^- -иона. Смена окислительных условий восстановительными сопровождается резким уменьшением Eh подземных вод от высоких положительных значений (+0,5...+0,07 в) до отрицательных (-0,08 в) и таким же резким снижением в воде количества урана. Расчетная величина Eh (равновесная с твердой фазой UO_2) при этом везде отрицательная (-0,03...-0,2 в) [11]. По данным И.Г. Минеевой [12], аналогичным образом изменяется окислительно-восстановительный потенциал современных подземных вод урановорудных альбититов. Среди рудничных вод, которые находятся в контакте с минералами, содержащими элементы переменной валентности (в основном Fe), по величине Eh выделяются: окислительные (+0,05...+0,25 в); восстановительные (-0,05...-0,24 в) и переходные — от слабоокислительных (0...+0,05 в) до слабовосстановительных (0...-0,05 в).

Хорошими сорбентами урана, как отмечалось выше, являются глинистые минералы, органические вещества (в том числе в почвах), фосфориты (например, внесенные в почвы соответствующие минеральные удобрения), сульфиды, а также электроположительные гидроокислы железа. Прекрасно трассирует структурные ловушки, резервуары накопления урана, карбонатное вещество.

Поверхностные месторождения урана

Ландшафтно-геохимические условия локализации. Урановорудный район Кировоградского мегаблока, располагаясь в области перехода между лесостепной и степной ландшафтно-геохимическими зонами [13], в климатическом и геоморфологическом отношении приближается к «сухому поясу» Канады (долина Оканаган), где широко развиты единственно рентабельные в Канаде (из числа поверхностных) «молодые» месторождения урана [8]. Сравнимые районы характеризуются переходом от постгляциальных условий с повышенной обводненностью к относительно сухим условиям семиаридного ландшафта со скудной растительностью и всхолмленным долинным рельефом. В Канаде молодые месторождения урана найдены на площадях как семиаридного климата, так и вечной мерзлоты; известны такого рода месторождения и рудопроявления и в различных частях Кировоградского блока [3, 7].

Гидрогеохимические характеристики ураноносных вод обоих районов также близки. Значения рН различных водных источников южной лесостепной и северной степной зон Украинского щита по нашим данным (всего 90 источников) составляют 5,0–8,0; для речных вод изученных канадских площадей они равны 6,0–8,8 [8]. Фоновые содержания U (10–5 г/л) в водах оцениваются величинами: для канадских площадей — 0,002–4,38; для центральной части Украинского щита — 0,1–5,0 [7]. Воды «сухого пояса» Канады чаще характеризуются щелочной реакцией со значениями рН > 7,5 при повышенном содержании бикарбонатов, а также аномально высокими концентрациями U — как правило, $0,5\text{--}30 \cdot 10^{-5}$ г/л и более. В пределах Кировоградского блока рН вод степного ландшафта (в среднем 6,6) повышается по сравнению с лесостепью (6,1); щелочные же воды с рН = 7,5–8,

как отмечалось выше, установлены в источниках по южному (более засушливому) обрамлению урановорудного района. Существенно гидрокарбонатный или гидрокарбонатно-сульфатный состав вод в районе г. Кировограда (Севериновское, Мичуринское месторождения) преобладает. Концентрация U (10–5 г/л) в источниках этого района составляет 0,06–3,4, достигая 22,8 в подземных водах месторождения. Значительный интерес представляют, тоже указанные выше, факты увеличения количества урана в трещинных водах по мере их продвижения от водораздельных участков к областям транзита и местам разгрузки, а также в водах коры выветривания ураноносных пород. Справедливо отметить, что содержание U в водах района ураноносных альбититов соответствует таковому вод большинства урановых месторождений, как эндогенных, так и экзогенных [18], как и указание на наличие ураноносных поверхностных и грунтовых вод во всех климатических зонах [2].

Источники урана. В районе ураноносных альбититов докембрийский фундамент Украинского щита сложен, в основном, новоукраинскими и кировоградскими гранитами, вмещающими их гнейсами ингуло-ингулецкой серии, а также различными продуктами их гранитизации (мигматиты, аплит-пегматоидная лейкосома и др.). В северной части района широко проявлены граниты рапакиви Корсунь-Новомиргородского плутона. Содержание U (г/т) в этих породах составляет в среднем от 2,1 в гнейсовых толщах до 3,2–3,5 в продуктах их гранитизации, кировоградских гранитах и гранитах рапакиви; новоукраинские граниты характеризуются пониженной ураноносностью (1,9) [1]. По другим данным [4] первично кластогенным породам нижнего протерозоя на Украинском щите присущи повышенные и дифференцированные концентрации урана: в среднем 4,4 г/т при кларке для Кировоградского блока — 2,7 г/т. Количество легкоизвлекаемого урана в породах амфиболитовой фации метаморфизма изменяется от 10–12% в метатерригенных разностях (гнейсах) до 20–25% в гранитоидах. Непосредственно в урановорудных полях (при общей значительной зараженности ураном) концентрация его в кристаллических породах (табл. 1) варьируется в самых широких пределах — от первых г/т до промышленно значимых (0,03–1,11% по нашим образцам). Доля подвижного урана, судя по формам его, охарактеризованным выше, также может быть весьма изменчивой. Особенно высокой она может быть в участках эпигенеза — диафтореза (зеленосланцевая фация метаморфизма), щелочного метасоматоза и гипергенеза. В частности, количество урана, вынесенного из разных зон коры выветривания гранитов и мигматитов района, оценивается в 25–42% (табл. 4). Степень тектонической нарушенности кристаллических пород, сопровождаемой глубинной циркуляцией подземных вод, достаточно высока, особенно в пределах урановорудных тектоно-метасоматических зон. Карбонатная составляющая также фиксируется, начиная от присутствия в составе гнейсового эдукта скарноидной (мергелистой) составляющей и заканчивая участием карбонатов в диафторитовых, альбититовых, продуктивных и пострудных ассоциациях.

Молодые ураноносные отложения Канады [8], в основном, перекрывают интрузивные породы докембрийского фундамента типа гранодиоритов — порфиридных гранитов (U 2,3–7,3 г/т). Обогащены ураном (14,6–18,8 г/т) сиениты, аляскиты, некоторые разновидности гранитов, а также небольшие рудные зоны с содержанием U в несколько сот г/т и выше. Количество подвижного урана в указанных разновидностях пород составляет 0,009–0,451 г/т или 0,4–2,4% от общего содержания. Важно отметить наличие молодых концентраций урана также в отложениях, перекрывающих гранодиориты, кварцевые диориты, монцониты с низким содержанием как общего (0,4–1,8 г/т), так и подвижного (доля 0,2–1,3%) урана. Значимыми факторами формирования таких месторождений исследователи [8] считают степень тектонической нарушенности кристаллических пород; наличие глубоко проникающих систем циркуляции подземных вод и карбонатного изменения, способствующего обогащению подземных вод бикарбонат-ионом.

Таким образом, в обоих сравниваемых районах оказываются налицо все факторы, способствующие мобилизации, переносу и возможной концентрации урана.

Типы поверхностных месторождений. Согласно исследованиям кайнозойских покровных отложений Украинского щита с точки зрения их ураноносности (В.А. Шумлянский, Е.Г. Сушук и др. [3]), большинство поверхностных концентраций приурочено к обогащенным растительной органикой отложениям бучакской свиты среднего эоцена. Бучакский горизонт, как показано выше, также контролирует положение участков уранового обогащения и в зоне гипергенеза Новоконстантиновского месторождения.

В составе отложений бучакской свиты выделяется речной, озерно-болотный и лагунно-лиманный фациальные комплексы. Наиболее распространены (и ураноносны) аллювиальные фации, выполняющие эрозионно-тектонические палеодолины и представленные гравийно-песчано-глинистым материалом с линзами бурого угля общей мощностью 2–20 м. Почти всегда они "запечатаны" сверху лиманно-лагунными отложениями, которые более продуктивны в восточной части щита. Озерно-болотные фации (наименее ураноносные), наоборот, характерны для северо-западной части щита.

В качестве важнейших факторов «молодого» уранового рудообразования отмечаются: гидрогеологический режим грунтовых вод, содержание урана в кристаллических породах и коре выветривания областей питания; проявление гидрогеохимической зональности, согласно которой кислородсодержащие ураноносные воды внизу по потоку сменяются сероводородными с количеством U на порядок ниже и с которой связано формирование эпигенетической зоны окисления; распространение урановых залежей до абсолютных отметок, соответствующих урзуводу основной водной артерии, что свидетельствует о формировании этих залежей именно потоком грунтовых вод. Эпигенетическая зональность, имеющая не только генетическое, но и прогнозно-поисковое значение, в полном виде представлена тремя зонами: (1) окисления (поверхностного, грунтового, пластового), (2) уранового оруденения — ниже зоны грунтового окисления или на выклинивании грунтового-пластового окисления и (3) неизменных пород. Рудные залежи имеют форму пластов, линз, роллов. Содержание U в системе серые (неизменные) песчаники и пески, обогащенные органикой → желто-бурые пески зон грунтового и грунтового-пластового окисления → черные (рудные) пески, песчаники, глины составляет 2,0–8,5; 1,6–12,0 и 13,3–355,5 г/т соответственно. Концентратором U в рудах в основном является углистое и глинистое вещество; в небольших количествах установлены урановая чернь, U-содержащие лейкоксен и гидроокислы Fe, а также сульфиды — марказит, пирит, мельниковит, бравоит, виоларит, иордизит. Элементы-спутники U представлены Mo, Re, Se, V, Ni, Co, Zn, Cu, Pb.

Из числа проявлений урана в аллювиальных отложениях бучакской свиты, развитых по южному обрамлению ураноносных альбититов, т.е. вдоль южного склона главного водораздела, важнейшими являются Сафоновское (25 млн лет), Братское (от 1–2 млн до 10–20 тыс. лет), Христофоровское, Садовое месторождения, а также Вербовецкое рудопроявление (2,4 млн лет); изотопный возраст урановых руд приведен по данным ГПП «Кировгеология». Начало эпигенетических инфильтрационных процессов относится к предкиевскому и предсарматскому (миоценовому) времени; наиболее широкое их развитие приходится на конец плиоцена — начало четвертичного периода. Исследование современной гидрогеохимической зональности указывает на формирование U оруденения и в настоящее время [3]. Наблюдаются также и обратные явления (разрушения), связанные с окислением рудных тел при понижении базиса эрозии в процессе поднятия щита и формирования современной речной сети, не совпадающей с палеодепрессиями.

В районе долины Оканаган (Канада) установлены озерно-плайеовые и аллювиальные месторождения [8].

Озерно-плайеовые концентрации связаны с солеными озерами, замкнутыми (окислительной и восстановительной фаций) либо циклично замыкающимися. Фундамент указанных месторождений сложен интрузивными породами, а накопление урана контролируется рельефом и уровнем испарения. Окислительные фации формируются в мелких бассейнах щелочных вод с высокой концентрацией солей; уран (до 2000 г/т) накапливается на поверхности; периодическое (летом) высыхание способствует ветровой эрозии. Восстановительные фации отличаются гиперсоленным профилем. На границе поверхностной сульфатной рапы с подстилающими глинами с гипсом и мергелистых песков на глу-

бине 2–4 м проявлены бактерии, фиксирующие серу. Уранил-карбонатные комплексы, содержащиеся в подземных водах, быстро разрушаются при подкислении среды и/или в условиях восстановления бактериями; в результате происходит сравнительно гомогенное обогащение ураном (до 1000 г/т) осадков по всей толще, но преимущественно в нижней части профиля. В циклично замыкающихся (соленых и солоноватых) бассейнах, т.е. в щелочных условиях, периодические поступления пресных вод приводят к появлению слоев, обогащенных органическим веществом, глиной и мергелем. Уран в них не всегда связан с прослоями, обогащенными органикой, возможно, в большей степени он контролируется восстановительными условиями в поровых водах, возникающими в процессе созревания органического материала. В некоторых случаях, в заболоченных водоемах, отмечаются признаки латерального движения грунтовых вод через определенную (геохимическую) ловушку. Количество урана при неравномерном распределении по профилю повсеместно повышено (50–1000 г/т).

Аллювиальные концентрации относятся к речным долинам и поймам. Среди ураноносных отложений выделяется несколько типов. Отложения бассейновых коллекторов в верховьях долин или у их бортов; насыщение их ураном происходит в местах разгрузки восходящих грунтовых вод, именно в зонах обогащенных органикой почв за счет испарения или катионного поглощения. Наиболее высокие содержания урана (более 1000 г/т) сосредоточены в поверхностном горизонте (до глубины 3 м). Болотные фации формируются в результате частичного подпруживания долины или как следствие ледниковой деятельности при отсутствии дренажа. Уран привносится грунтовыми водами (пресными или щелочными) и фиксируется, главным образом, органическим веществом в виде залежей, имеющих форму языков или роллов, в нижних частях профилей. В пойменных отложениях (русла, старицы, прирусловые валы, пойменные луга, дельтовые фации) как крупных зрелых рек, так и небольших меандрирующих, обнаружены значительные, но довольно рассеянные концентрации урана. Везде уран привносится грунтовыми водами в профиль обломочных осадков (алеврит, песок, гравий), обогащенных органическим веществом, с последующим осаждением этим веществом (+ катионный обмен). Содержание урана во всех перечисленных типах достигает 1000 г/т.

По имеющимся данным [8] ни в одном поверхностном месторождении долины Оканган не установлено урановых минералов, скорее всего уран свободно связан с органикой и глинами и поэтому легко повторно мобилизуется. Кроме U, в большинстве случаев отмечаются концентрации Mo, в отдельных месторождениях — Se, но характерно отсутствие V.

Значения коэффициента радиоактивного равновесия на ряде объектов Канады и западной части США свидетельствуют о молодом возрасте месторождений — 0,1–0,75 млн. лет, часто они моложе 12 тыс. лет [15].

В генетическом плане общим для всех поверхностных месторождений урана (Украины, Канады и других районов мира) является непрерывность процесса их формирования [3, 15]. Перенос урана на путях транзита от источника до вмещающих пород происходит в окислительной обстановке (в основном в форме карбонат-уранильных комплексов) с возможным фиксированием в виде временных концентраций, например, в определенных горизонтах коры выветривания на восстановительных барьерах, и повторной мобилизацией. Для этих условий вообще характерны эпигенетические концентрации урана, контролируемые кислородной геохимической зональностью — пластовой в осадочном чехле или трещинной в породах фундамента, в том числе в урановых альбититах. В осадочных породах чехла накопления урана могут образоваться уже в ходе седиментогенеза и раннего диагенеза, впоследствии разрушаясь или преобразуясь с перемещением вниз по водному потоку. В породах фундамента такие образования характеризуются сложной вертикальной геохимической зональностью, определяемой особенностями тектонических зон, а также базисом древней и современной эрозии. Они трудноотличимы от эндогенных гидротермальных продуктов, в частности, если их проявления пространственно совпадают с альбититовыми месторождениями.

Основные причины осаждения урана из грунтовых вод (разрушения карбонат-уранильных комплексов) это: наличие восстановительных барьеров (уровень грунтовых вод, смена эдукта или расходование кислорода во время транзита), проявление эффектов испарения на поверхности или смешения вод, а также сорбционные процессы в благоприятных породах (зрелая органика, глинистые минералы, фосфориты, гидрокислы железа).

Некоторые прогнозно-поисковые рекомендации. Подчеркнем, что мы рассматриваем поверхностные (молодые) накопления урана в современном научном понимании [10]. Более древние эпигенетические его концентрации в настоящей разработке не анализируются. В соответствии с поставленной целью, нами также ограничен район возможного образования таких концентраций районом развития ураноносных альбититов Кировоградского блока.

Важнейшей особенностью таких концентраций является то, что «молодой» уран почти не сопровождается дочерними продуктами и, следовательно, не проявлен радиоактивными аномалиями [8]. Авторы называют некоторые исключения из этого правила: резкое поверхностное обогащение, сопровождающееся обезвоживанием; прямое осаждение из природных водных источников. Хотя при поверхностном обогащении ураном до 2000 г/т даже менее 2% равновесия с дочерними продуктами оказывается достаточным для обнаружения урановых руд сцинтиллометрами, тем не менее, в большинстве случаев при поисках молодых концентраций требуется применение нестандартной методики.

Основные региональные критерии их поисков включают: наличие ураноносных пород в областях питания пластовых вод; широкое развитие U-содержащих трещинно-грунтовых вод и направленный их сток от источников питания к местам разгрузки; наличие в фундаменте палеодепрессий, содержащих отложения благоприятных литолого-фациальных комплексов пород и водоупорных отложений, их перекрывающих; размещение этих отложений выше уровня региональных дрен.

С точки зрения климатических, геоморфологических, гидродинамических и гидрогеохимических условий, а также потенциальных источников урана Кировоградский блок представляется весьма перспективным именно для поисков поверхностных молодых его концентраций. Этот вывод вполне подтверждается сопоставлением материалов по Канадскому и Украинскому щитам. Перспективной зоной поисков таких концентраций можно считать южное обрамление района альбититовых месторождений, а именно, левобережье Южного Буга в сочетании с его левыми притоками — Синюхой, Ингулом и Ингульцом. Эта гидрогеологическая система определяет участки, где благоприятно сочетаются места разгрузки обогащенных ураном подземных вод, степень аридности климата со щелочной реакцией грунтовых вод и наличие среди покровных фаций пород-осадителей. Мы имеем в виду не только бучакские отложения в сочетании с региональным водоупором — глинами киевской свиты, но также и другие возможные ловушки, от черных лагунно-озерных песков аптского водоносного горизонта (на южном склоне Украинского щита) до современных кокколитовых илов, где содержание U может превышать количество его в воде на несколько порядков. Протяженность зоны транзита здесь достигает десятков километров, что является весьма благоприятным фактором; разгрузка подземных вод может происходить по разрывным нарушениям, в том числе, например, в среднем течении р. Ингул с урезом воды +20 м (абсолютная отметка).

Выводы

1. Содержание урана на изученных месторождениях приблизительно одинаковое (в среднем, г/т): от 4,8–15,9 во вмещающих породах и 13,0–25,1 в безрудных альбититах до 80,3–197,7 в слабрудных альбититах и 835,0–2409,6 в кондиционных рудах. Различие концентрации урана в оруденелых и рудных альбититах (бортовое содержание) взято по величине 300 г/т, т.е. значительное количество металла при разработке месторождений уйдет в отвалы. Особо следует подчеркнуть возможное наличие в рудных зонах регенерированных локальных проявлений урана и сопутствующих элементов, не связанных с альбититами, например рудопроявление Обгонное на северном фланге Мичуринского поля. Здесь в Bi-U рудах содержание U в тектонической глинке достигает ураганного — около 15,5%, в полосе 10–20 см от рудной жилы количество U составляет 0,03–0,05%, т.е. соизмеримо с промышленным. Учитывая ориентированность поисково-разведочных и эксплуатационных работ на альбититы, такие концентрации могут также попадать в отвалы.

2. Среди форм нахождения U в рудной массе выделены: уран собственных (первичных и вторичных) минералов, высокорadioактивных акцессорных минералов, рассеянный в породообразующих минералах и мобилизованный вторичными процессами. Обращают на себя внимание два обстоятельства. Во-первых, среди перечисленных форм, отсутствуют те, в которых U сохранял бы полную инертность: даже такие акцессорные минералы как циркон и монацит обнаруживают признаки регенерации с перераспределением урана. Во-вторых, значительная часть урана во всех блоках пород, подлежащих эксплуатационной выемке, может быть отнесена к «подвижной», т.е. обладает достаточно высокой миграционной способностью. Эта форма может быть источником загрязнения подземных и поверхностных вод и почв. Но она может извлекаться, увеличивая полезный выход рудного урана, при использовании технологий выщелачивания, либо формировать вторичные (молодые) концентрации.

3. Гипергенез, проявленный на всех изученных объектах, сопровождается как выносом урана (до 42%) из каолиновой зоны коры выветривания, так и накоплением его в зоне обогащения. На Новоконстантиновском месторождении установлено два таких участка (обогащения): в подошве бучакских покровных (угленосных) отложений и в подошве коры выветривания ниже уровня грунтовых вод вместе с сидеритом. Поведение урана и других элементов с переменной валентностью характеризуется сходными чертами, а именно: выносом из зоны окисления и относительным временным накоплением на восстановительном барьере в промежуточных зонах, чаще в каолин-гидрослюдистой. Показательным для участков проявления гипергенных процессов является нарушение равновесия U-Pb систем: верхним зонам присущ избыток радиогенной добавки Pb, тогда как с глубиной, за счет привноса урана сверху из зоны окисления, все более растет дефицит ^{206}Pb .

4. Содержание урана в подземных и поверхностных водах района Кировограда варьирует от 0,6 до $228 \cdot 10^{-6}$ г/л; максимальное его количество определено в пробе воды из самоизливающейся скважины в самом Кировограде. Значения рН в дождяной, лесостепной и северной степной зонах блока по нашим данным составляет 5,0–8,0. Щелочные воды с рН 7,5–8 установлены по южному обрамлению урановорудного района; эти воды в среднем отличаются повышенным содержанием дейтерия: $\delta D = -74,7\%$. Среднее значение δD нейтральных и кислых вод (рН 5–7) составляет $-82,6\%$. Преобладающими формами миграции U в водах разного характера минерализации, по-видимому, являются анионные формы в виде ди- и трикарбоната урана $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2-}$ и $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$. Существенно гидрокарбонатный состав вод непосредственно в районе г. Кировограда зафиксирован в большинстве источников.

5. С точки зрения климатических, геоморфологических, гидродинамических и гидрогеохимических условий, а также потенциальных источников урана Кировоградский блок представляется весьма перспективным для поисков поверхностных молодых концентраций урана. Этот вывод вполне подтверждается сопоставлением материалов по Канадскому и Украинскому щитам. Перспективной зоной поисков таких концентраций можно считать южное обрамление района альбититовых месторождений, а именно, левобережье

Южного Буга в сочетании с его левыми притоками — Синюхой, Ингулом и Ингульцом. Эта гидрогеологическая система определяет участки, где благоприятно сочетаются места разгрузки обогащенных ураном подземных вод, степень аридности климата со щелочной реакцией грунтовых вод и наличие среди покровных фаций пород-осадителей. При этом, имеются в виду не только отложения бучакской свиты, но также и другие ловушки, с учетом отечественного и зарубежного опыта. В работе с поверхностными концентрациями следует учитывать, что «молодой» уран почти не сопровождается дочерними продуктами и, следовательно, может не проявиться радиоактивными аномалиями. Поэтому для поисков таких концентраций может потребоваться применение нестандартной методики.

1. Белевцев Я.Н., Егоров Ю.П., Титов В.К. и др. Средние содержания урана и тория в главнейших типах горных пород Украинского щита // Геол. журнал. — 1975. — 35, вып. 4.
2. Бойл. Д.Р. Генезис поверхностных месторождений урана. Материалы по геологии урановых месторождений зарубежных стран. Москва: 1987. — Вып. 38. — С. 64–83.
3. Генетические типы и закономерности размещения урановых месторождений Украины. Отв. редакторы Я.Н. Белевцев, В.Б. Коваль. Киев: Наук. Думка, 1995. — 396 с.
4. Геология и генезис месторождений урана в осадочных и метаморфических толщах. Москва: Недра, 1980. — 270 с.
5. Герасимов Ю.Г., Сонкин Л.В., Завьялова Н.Н. Распределение радиоактивных и малых элементов в коре выветривания чудново-бердичевских гранитов Украинского щита. Радиоактивные элементы в горных породах. Часть I. Новосибирск, 1972. — С. 49–50.
6. Ємець О.В., Пономаренко О.М., Кюні М. та ін. Мінералого-геохімічні особливості та вік уранового зруденіння альбітитів Кіровоградського блоку на прикладі Новокостянтинівської урановорудної ділянки (Новоукраїнський гранітний масив, Український щит) // Мінерал. журн. — 2007. — 29, № 2. — С. 102–110.
7. Закономерности образования и размещения урановых месторождений Украины. Отв. редактор Я.Н. Белевцев. Киев: 1968. — 763 с.
8. Калберт Р.Р., Бойл. Д.Р., Левинсон А.А. Поверхностные месторождения урана в Канаде. Материалы по геологии урановых месторождений зарубежных стран. Москва: 1987. — Вып. 38. — С. 83–105.
9. Копченова Е.В., Авдонин А.С., Сидоренко Г.А. и др. К вопросу о ненадкевите // Зап. Вессоюз. минерал. о-ва. — 1977. — Ч. 106, вып. 4. — С. 387–395.
10. Кудрявцев В.Е., Корнеева Н.П., Титова Р.С. Поверхностные месторождения урана. Материалы по геологии урановых месторождений зарубежных стран. Москва: 1987. — Вып. 38. — С. 9–37.
11. Лисицин А.К. О формах нахождения урана в подземных водах и условия его осаждения в виде UO_2 // Геохимия. — 1962. — № 9. — С. 763–769.
12. Минеева И.Г. Минералого-геохимические аспекты формирования ураноносных альбититов докембрия // Сов. геология. — 1986. — № 3. — С. 87–93.
13. Міцкевич Б.Ф. Геохімічні ландшафти Українського щита. — Київ: Наук. думка, 1971. — 174 с.
14. Наумов Г.Б. Основы физико-химической модели уранового рудообразования. Москва: Атомиздат 1978. — 213 с.
15. Оттон Дж. К. Поверхностные месторождения урана: обзор и выводы. Материалы по геологии урановых месторождений зарубежных стран. Москва: 1987. — Вып. 38. — С. 38–49.
16. Почтаренко В.И., Фомин Ю.А., Войновский А.С., Боев Н.И. Временные методические рекомендации по проведению глубинных литохимических поисков (применительно к условиям Украинского щита). Изд-во МИНГЕО Украины. Киев. 1985. — 60 с.
17. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. Ленинград: Недра, 1974. — 231 с.
18. Токарев А.Н., Куцель Е.Н., Попова Т.П. и др. Радиогидрогеологический метод поисков месторождений урана. — Москва: Недра, 1975. — 255 с.
19. Фомин Ю.А. Некоторые закономерности распределения радиоактивных элементов в минералах вулканических пород // Геол. журн. — 1988. — 48. — № 6. — С. 79–83.
20. Фомин Ю.А. Генетическое соотношение золотого и уранового оруденения Кіровоградської тектоно-метасоматической зоны. Геохімія та екологія. — Київ. — 2006. — Вип. 12. — С. 11–18.
21. Фомин Ю. А., Деміхов Ю. Н. Изотопный состав углерода и серы раннепротерозойских пород центральной части Украинского щита // Доп. НАН України. — 2008. — № 7. — С. 123–129.
22. Фомин Ю.А., Деміхов Ю.Н., Лазаренко Е.Е. Особенности рудообразующего флюида Новоконстантиновского месторождения урана (Украинский щит) // Доп. НАН України. — 2009. — № 4. — С. 130–136.
23. Шалмина Г.Г. Естественные радиоактивные элементы в профилях выветривания каолинитового и гидрослюдистого типов гумидного пояса (на примере Урала и Сибири). Автореферат кандидатской диссертации. Новосибирск, 1971. — 23 с.
24. Щербина В.В. Основы геохимии. Москва: Недра, 1972. — 296 с.

Фомін Ю.О., Деміхов Ю.М., Суцук К.Г. СИСТЕМА УРАНОНОСНИХ АЛЬБІТИТІВ ЯК ПОТЕНЦІЙНЕ ДЖЕРЕЛО ПОВЕРХНЕВИХ РОДОВИЩ УРАНУ ТА/АБО ТЕХНОГЕННІ НЕБЕЗПЕКИ.

Розглянуто особливості поведінки урану у системі: докембрійські ураноносні альбітити та вміщуючі їх породи Кіровоградського мегаблоку — мезокайнозойська зона гіпергенезу — сучасні підземні і поверхневі води. На основі проведеного дослідження та порівняння цього району Українського щита зі схожим ураноносним районом Канадського щита проведено оцінку перспектив утворення у межах блоку поверхневих уранових концентрацій. Отримані дані пропонується використовувати для прогнозування і пошуку поверхневих родовищ та вивчення техногенних ризиків.

Fomin Yu.A., Demikhov Yu.N., Sushchuk K.G. SYSTEM OF URANIUM-BEARING ALBITITES AS SOURCE OF POTENTIAL SURFICIAL URANIUM DEPOSITS AND/OR TECHNOGENOUS DANGER.

The peculiarities of uranium behavior at the system: Precambrian uranium-bearing albitites and host rocks at Kirovograd mega block — Meso-Cainozoic zone of hyper genesis — present-day underground and superficial waters were examined. On the base of present investigation and comparison of this region of Ukrainian Shield with like uranium-bearing region of Canada Shield the perspectives of surficial uranium deposit forming were estimated. The received data should be used for prognosis and search of surficial deposits and researching of technogene safety.