

Ю. А. Фомин, Ю. Н. Демихов, Е. Г. Суцук

Система ураноносных альбититов как потенциальный источник поверхностных месторождений урана

(Представлено академиком НАН Украины Е. А. Кулишом)

На основі розгляду еволюції системи альбититових родовищ Кіровоградського мегаблока та порівняння цього району зі схожим районом Канадського щита проведено оцінку перспектив утворення у межах блока поверхневих уранових родовищ.

Поверхностными месторождениями урана в современной литературе принято называть молодые (не древнее третичных) или даже современные ураноносные осадочные породы и почвы, сформированные грунтовыми водами вблизи поверхности или на относительно небольших глубинах [1]. Судя по мировому опыту, они не обязательно связаны с переотложением более древних руд, их источниками обычно становятся породы с фоновыми содержаниями элемента [1–4]. При их образовании существенное значение имеют ландшафтно-геохимические условия, хотя, как подчеркивает Д. Р. Бойл [3], 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”.

Учитывая значительную (10–15%) и все возрастающую долю таких месторождений в мировых запасах металла и высокую их рентабельность [1], нами впервые предпринимается попытка оценить раннедокембрийский урановорудный район Кировоградского мегаблока [5, 6] как перспективный источник поверхностных концентраций урана. В основу работы положены, во-первых, рассмотренная ранее [7] эволюция месторождений альбититовой формации, включая ураноносность самих альбититов и вмещающих их пород, зоны гипергенеза и гидросферы, во-вторых, сравнение района украинских объектов со сходным районом Канадского щита [4].

Ландшафтно-геохимические условия локализации поверхностных концентраций урана. Урановорудный район Кировоградского мегаблока, располагаясь в области перехода между лесостепной и степной ландшафтно-геохимическими зонами [8], 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 [4]. 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 в различных частях Кировоградского блока [5, 6].

Гидрогеохимические характеристики ураноносных вод обоих районов также близки. Значения рН водных источников южной лесостепной и северной степной зон Украинского щита по нашим данным составляют 5,0–8,0; для речных вод изученных канадских площадей они равны 6,0–8,8 [4]. Фоновые содержания в водах U оцениваются величинами,

10^{-5} г/л: для канадских площадей — 0,002–4,38; для центральной части Украинского щита — 0,1–5,0 [5]. Воды “сухого пояса” Канады чаще характеризуются значениями $pH > 7,5$ при повышенном содержании бикарбонатов, а также аномально высокими концентрациями U — $(0,5–30) \cdot 10^{-5}$ г/л и более. В пределах Кировоградского блока pH вод степного ландшафта (в среднем 6,6) повышается по сравнению с лесостепью (6,1); щелочные же воды с $pH 7,5–8,0$ установлены в источниках по южному (более засушливому) обрамлению урановорудного района. Существенно гидрокарбонатный или гидрокарбонатно-сульфатный состав вод преобладает в районе г. Кировограда. Концентрация U в источниках этого района составляет $(0,06–3,40) \cdot 10^{-5}$ г/л, достигая 22,8. Количество урана в трещинных водах увеличивается также по мере их продвижения от водораздельных участков (1,0) к областям транзита и местам разгрузки (3,0). Повышается оно и в участках развития коры выветривания, особенно по породам с повышенным содержанием урана (ураноносным альбититам): в среднем 7,0, до 15–30, т. е. более чем на порядок по сравнению с содержанием в водах четвертичных отложений, питающих трещинные воды [6, 7]. Следует отметить, что содержание U в водах района ураноносных альбититов соответствует таковому вод большинства урановых месторождений как эндогенных, так и экзогенных [9].

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 в этих породах составляет в среднем от 2,1 г/т в гнейсовых толщах до 3,2–3,5 г/т в продуктах их гранитизации, кировоградских гранитах и гранитах рапакиви; новоукраинские граниты характеризуются пониженной ураноносностью (1,9) [10]. По другим данным [11] 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 варьируется в самых широких пределах — от первых граммов на тонну до промышленно значимой (0,03–1,11% по нашим образцам). Доля подвижного урана, судя по его формам, также может быть весьма изменчивой. Особенно высокой она может быть в участках эпигенеза — диафтореза (зеленосланцевая фация метаморфизма), щелочного метасоматоза и гипергенеза. В частности, количество U, вынесенного из разных зон коры выветривания гранитов и мигматитов района, оценивается в 25–42% [7]. Степень тектонической нарушенности кристаллических пород, сопровождаемой глубинной циркуляцией подземных вод, достаточно высока, особенно в пределах урановорудных тектонометасоматических 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 [4] в основном перекрывают интрузивные породы докембрийского фундамента типа гранодиоритов — порфиroidных 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 граммов на тонну и выше. Количество подвижного урана в указанных разновидностях пород состав-

ляет 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, монциты с низкими содержаниями как общего (0,4–1,8 г/т), так и подвижного (доля 0,2–1,3%) U. Значимыми факторами формирования таких месторождений исследователи [4] считают степень тектонической нарушенности кристаллических пород; наличие глубоко проникающих систем циркуляции подземных вод и карбонатного изменения, способствующего обогащению подземных вод бикарбонат-ионом.

Типы поверхностных месторождений. По данным В. А. Шумлянського, Е. Г. Суцук и др. [6], большинство поверхностных концентраций приурочено к обогащенным растительной органикой отложениям бучакской свиты среднего эоцена. Бучакский горизонт также контролирует положение участков уранового обогащения и в зоне гипергенеза Новоконстантиновского месторождения. В составе отложений бучакской свиты выделяется речной, озерно-болотный и лагунно-лиманский 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 слабо продуктивными лиманно-лагунными отложениями. Озерно-болотные фации (наименее ураноносные), наоборот, характерны для северо-западной части шита.

В качестве важнейших факторов “молодого” уранового рудообразования отмечаются: гидрогеологический режим грунтовых вод и содержание U в кристаллических породах и коре выветривания областей питания; проявление гидрогеохимической зональности, согласно которой кислородсодержащие ураноносные воды вниз 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 урезу воды 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) неизмененных пород. Рудные залежи имеют форму пластов, линз, роллов. Содержание U в системе: серые (неизмененные) песчаники и пески, обогащенные органикой → желто-бурые пески зон грунтового и грунтового-пластового окисления → черные (рудные) пески, песчаники, глины составляют 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 урана 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 ГГП “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 [6].

Наблюдаются также и обратные явления, 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-плайевые и аллювиальные месторождения [4]. Озерно-плайевые концентрации связаны с солеными озерами, замкнутыми (окислительной и восстановительной фациями) 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; U (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 глубине 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 U 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 U (> 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 [4], ни в одном поверхностном месторождении долины Оканаган не установлено минералов урана, скорее всего он 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 [2].

В генетическом плане общим для всех поверхностных месторождений урана (Украины, Канады и других районов мира) является непрерывность процесса их формирования [2, 6]. 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, гидроокислы железа).

В поисковом плане особенностью таких концентраций является то, что “молодой” уран почти не сопровождается дочерними продуктами и, как правило, слабо проявлен радиоактивными аномалиями [2, 4]. Отсюда вытекают сложности обнаружения поверхностных месторождений, поэтому в большинстве случаев при их поисках 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 палеодепрессий в фундаменте, 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. Это 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.

Таким образом, важность проблемы молодых поверхностных месторождений урана заключается еще и в том, что описанные процессы продолжаются в настоящее время и могут оказывать существенное влияние на экологическую обстановку.

1. *Кудрявцев В. Е., Корнеева Н. П., Титова Р. С.* Поверхностные месторождения урана : Материалы по геологии урановых месторождений зарубежных стран. – Москва: Б. и., 1987. – Вып. 38. – С. 9–37.
2. *Оттон Дж. К.* Поверхностные месторождения урана: обзор и выводы // Там же. – С. 38–49.
3. *Бойл Д. Р.* Генезис поверхностных месторождений урана // Там же. – С. 64–83.
4. *Калберт Р. Р., Бойл Д. Р., Левинсон А. А.* Поверхностные месторождения урана в Канаде // Там же. – С. 83–105.
5. *Закономерности образования и размещения урановых месторождений Украины* // Отв. ред. Я. Н. Белевцев. – Киев: Б. и., 1968. – 763 с.
6. *Генетические типы и закономерности размещения урановых месторождений Украины* / Отв. ред. Я. Н. Белевцев, В. Б. Коваль. – Киев: Наук. думка, 1995. – 396 с.
7. *Фомин Ю. А., Демихов Ю. Н., Сущук Е. Г.* Поведение урана в процессах эволюции альбититовых месторождений Кировоградского мегаблока // Доп. НАН України. – 2010. – № 1. – С. 131–137.
8. *Мицкевич Б. Ф.* Геохімічні ландшафти Українського щита. – Київ: Наук. думка, 1971. – 174 с.
9. *Токарев А. Н., Куцель Е. Н., Попова Т. П.* Радиогидрогеологический метод поисков месторождений урана. – Москва: Недра, 1975. – 255 с.
10. *Белевцев Я. Н., Егоров Ю. П., Титов В. К. и др.* Средние содержания урана и тория в главнейших типах горных пород Украинского щита // Геол. журн. – 1975. – **35**, вып. 4. – С. 96–117.
11. *Геология и генезис месторождений урана в осадочных и метаморфических толщах.* – Москва: Недра, 1980. – 270 с.

*Институт геохимии окружающей среды
НАН Украины и МЧС Украины, Киев*

Поступило в редакцию 18.06.2009

Yu. A. Fomin, Yu. N. Demikhov, E. G. Sushchuk

The system of uranium-bearing albitites as a potential source of superficial uranium deposits

On the base of examining the evolution of the albitite deposit system at the Kirovograd megablock and the comparison of this region with a like uranium-bearing region of the Canada Shield, the perspectives of the formation of superficial uranium deposits are estimated.