

**РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ЩЕЛОЧНО-КАРБОНАТИТОВОМ
КОМПЛЕКСЕ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ
(ЦЕНТРАЛЬНАЯ РОССИЯ)**

В. Л. Бочаров

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 25 февраля 2015 г.

Аннотация: *исследовано распределение радиоактивных элементов – урана и тория в щелочных породах и карбонатитах дубравинского комплекса КМА. Основное количество этих элементов связано с акцессорными минералами – апатитом и сфеном. По общему уровню накопления урана и тория щелочные породы и карбонатиты близки к аналогичным породным ассоциациям черниговского комплекса Украинского Приазовья. Однако отношение тория к урану в породах дубравинского комплекса устойчиво выше единицы и приближается к хондритовому показателю. То же самое наблюдается в породах щелочно-карбонатитовой ассоциации Гулинского массива севера Сибирской платформы, при значительно большем уровне концентрации в них радиоактивных элементов.*

Ключевые слова: *радиоактивные элементы, щелочные породы, карбонатиты, акцессорные минералы, кристаллизационная дифференциация, торий-урановое отношение, частичное плавление мантии.*

**RADIOACTIVE ELEMENTS IN THE ALKALINE AND KARBONATITES COMPLEX
THE KURSK MAGNETIC ANOMALY (CENTRAL RUSSIA)**

ABSTRACT: *DISTRIBUTION OF RADIOACTIVE ELEMENTS – URANIUM AND THORIUM IN ALKALINE BREEDS AND THE CARBONATITE OF THE KMA DUBRAVINSKY COMPLEX. THE MAIN QUANTITY OF THESE ELEMENTS IS CONNECTED WITH ACCESSORY MINERALS – APATITE AND SIENY. ON THE GENERAL LEVEL OF ACCUMULATION OF URANIUM AND THORIUM IN BREEDS AND KARBONATITE ARE CLOSE TO SIMILAR PEDIGREE ASSOCIATIONS OF THE CHERNIGOV COMPLEX OF THE UCRANIAN PRIAZOVYE. HOWEVER THE THORIUM RELATION TO URANIUM IN BREEDS OF A DUBRAVINSKY COMPLEX STAYS ABOVE UNIT AND COMES NEARER TO A CHONDRITES INDICATOR THE SAME IS OBSERVED IN BREEDS ALKALINE CARBONATITES ASSOCIATION OF THE GULINSKY MASSIF OF THE NORTH OF THE SIBERIAN PLATFORM, AT MUCH BIGGER LEVEL OF CONCENTRATION IN THEM RADIOACTIVE ELEMENTS.*

KEYWORDS: *RADIOACTIVE ELEMENTS, ALKALINE BREEDS, KARBONATITES, ACCESSORY MINERALS, CRYSTALLIZATION DIFFERENTIATION, THORIUM - THE URANIUM RELATION, PARTIAL MELTING OF A CLOAK.*

Введение

Щелочные породы и карбонатиты отличаются наиболее высоким уровнем накопления радиоактивных элементов среди магматических пород. Особенно это характерно для крупных щелочных ультраосновных-основных с карбонатитами комплексов мезозойского возраста, с которыми возможна связь крупных, экономически значимых скоплений радиоактивных металлов – урана и тория [1]. Присутствуют эти элементы и в щелочно-карбонатитовых ассоциациях более древних протерозойских магматических систем. Однако сведения о радиоактивности щелочных пород и карбонатитов, как и о самих интрузивных массивах докембрийских геологических структур, включающих эти породы, крайне ограничены.

В этой связи особый интерес приобретают иссле-

дования распределения радиоактивных элементов в протерозойских линейно-трещинных массивах щелочных пород и карбонатитов, одним из которых является Дубравинский, расположенный в Старооскольском рудном районе Курской магнитной аномалии (КМА, [2]).

**Геолого-петрографическая характеристика
Дубравинского массива**

Дубравинский массив представляет собою вытянутое и дугообразно изогнутое интрузивное тело, крутопадающее (75–80°), с общим юго-восточным склонением. По геолого-геофизическим данным массив приурочен к пересекающимся тектоническим нарушениям субширотного и субмеридианального направлений. Разрывные нарушения усложняют строе-

ние массива. Вмещающими образованиями являются кристаллические сланцы и мигматиты, сформировавшиеся по породам михайловской серии неоархея, метаморфизованные в условиях амфиболитовой фации регионального метаморфизма, а также различные по составу гнейсы и амфиболиты обоянской серии палеоархея. Общая протяженность Дубравинского массива около 7 км при максимальной ширине (в плане) 600 м [3].

Детальное построение разрезов скважин пяти профилей, полностью перекрывающих пространственно совмещенные интрузивные и полиминеральные метасоматические породы, а также изучение обширного петрографического материала позволило проследить размещение пород в разрезах и по простиранию, выявить взаимоотношения между ними, установить относительные количественные соотношения магматических и метасоматических образований и определить общую последовательность становления породных ассоциаций Дубравинского массива [4].

На основании геолого-петрологических данных выделено наличие главных интрузивных фаз: 1) наиболее ранняя щелочно-ультрамафитовая, представленная преимущественно щелочными пироксенитами (эгириин-авгитовыми) и редко – субкальциевыми диопсидитами, иногда с оливином; 2) последующая, собственно карбонатитовая, сформировавшая кальцитовые и, реже, доломит-кальциевые карбонатиты, силикокарбонатиты, апатитовые и апатит-магнетитовые руды; 3) завершающая граносиенитовая малых интрузивных тел, даек и жил щелочных гранитов и сиенитов.

Последовательное проявление выделенных интрузивных фаз подтверждается: 1) наличием за пределами Дубравинского массива самостоятельных малых интрузий щелочных пироксенитов (без карбонатитов или с маломощными жилами силикокарбонатитов), даек щелочных сиенитов и гранитов (с акцессорным апатитом); 2) контактово-реакционными взаимоотношениями интрузивных фаз с выделением зон метасоматических пород; 3) ксенолитами пород предшествующих фаз в последующих магматических парагенезисах [2].

Карбонатиты и силикокарбонатиты (силикатно-карбонатные породы) являются генетически едиными образованиями карбонатитового расплава, внедрявшегося по каналу предшествующей интрузии щелочных пироксенитов и оказавшей на последние интенсивное влияние. Об этом свидетельствует большой объем кальцитизированных пироксенитов и наличие контактово-реакционных метасоматитов. Размещение карбонатитов и силикокарбонатитов и их объемные соотношения в интрузии неодинаковы, при этом нередко проявлена некоторая зональность с тяготением силикатно-карбонатных пород к краевым частям интрузивного тела. Размещение апатита, магнетита, сфена в пределах карбонатитовых тел носит неравномерный характер – от рассеянного состояния до гнездовых, линзовидных, полосовидных скоплений и собственно пластовых магнетит-apatитовых руд с мак-

симальной мощностью до 15 м. Руды находятся как среди силикокарбонатитов, так и в мезо-меланократовых карбонатитах. Одно тело магнетит-apatитовых руд выделяется, кроме того, среди щелочных пироксенитов. Такое положение свидетельствует о более позднем по отношению к пироксенитам заполнении разрывного нарушения рудной составляющей карбонатитового расплава.

Щелочные сиениты и граниты представляют собой жильную субстанцию карбонатитового комплекса завершающей стадии магматизма. Положение мелких жил может быть связано с разрывными нарушениями различного направления. Более крупные сиенитовые тела располагаются ближе к согласному с общим крутым склонением интрузии пироксенитов и карбонатитов, использовавших направления глубинных разломов. Наличие ксенолитов щелочных пироксенитов и карбонатитов в сиенитах и контактово-реакционных образований свидетельствует о наиболее позднем внедрении последних.

Многочисленные ксенолиты фенитов (по гнейсам) встречаются во всех интрузивных составляющих карбонатитового комплекса. Изредка отмечается присутствие фенитизированных амфиболитов вмещающих пород. Фениты по породам гранитного и сиенитового составов отчетливо выделяются своим однородно-мелкокристаллическим (сахаровидным) обликом со слабым межзерновым сцеплением, чем отличаются от жильных мелкозернистых гранитов и сиенитов. В крупных ксенолитах фенитизированных гнейсов наблюдаются реликтовые признаки исходной породы в виде корродированных кристаллоблоков полевых шпатов среди новообразованной мелкозернистой микроклиновой массы фенита и ориентированной текстуры гнейса.

Количественные соотношения между главными интрузивными составляющими Дубравинского массива, рассчитанные по суммарной мощности каждого петрографического типа, следующие (в %): щелочные пироксениты (вместе с алопироксенитовыми метасоматитами) – 50, карбонатиты и силикокарбонатиты – 30, щелочные граниты и сиениты – 20. Таким образом, из геолого-петрографической характеристики можно сделать основные обобщения: 1) щелочно-пироксенитовые и карбонатитовые тела образуют в совокупности единую главную часть Дубравинского массива; 2) в лежащем боку массива вскрыта основная масса щелочных сиенитов и гранитов; 3) вмещающие породы представлены преимущественно фенитами по гнейсам и амфиболитами.

Геохимия урана и тория

Уран и торий являются некогерентными литофильными элементами и обладают низкими коэффициентами распределения в главных породообразующих минералах магматических пород. По этой причине эти элементы накапливаются, как правило, в конечных продуктах кристаллизационной дифференциации. Обладая устойчивыми литофильными свойствами и сходными физико-химическими характери-

Физические и химические константы радиоактивных элементов

Атомный номер	Масса изотопов	Период полураспада изотопов, млн лет	Радиус атома, нм при к. ч. 12	Электронная конфигурация	Степени окисления	Энергия ионизации, эВ	Радиус ионов, нм	Плотность, г/см ³	Молярный объем, см ³ /моль	Температура плавления, К	Изоморфизм
Уран											
92			152	5f ² 6d ¹ 7s ²	4, 6	7,1	(+6e) 80; (+4e) 97	19,05	12,5	1405,5	U → Th, Y, K, Ca, V
	234	2,48 · 10 ⁵									
	235	7,13 · 10 ⁸									
	238	4,5 · 10 ⁹									
Торий											
90			180	6d ² 7s ²	4	28,7	(+4e) 102	17,28	11,1	1280,2	Th → U, Ce, Y, Ca
	221	1,91									
	227	18,7 дн									
	230	7,52									
	231	25,52 час									
	232	1,39 · 10 ¹⁰									
	234	24,1 дн									

стиками, уран и торий образуют природные соединения в основном с кислородом и реже со фтором с преобладающим ионным типом химической связи (табл. 1).

В природе уран представлен тремя изотопами в отличие от тория, образующего шесть изотопов. Главными изотопами урана являются изотопы с массовыми числами 235 и 238. Среди изотопов тория главным является изотоп с массовым числом 232. Уран в эндогенных условиях может быть четырех- и шестивалентным катионом в отличие от тория, который в сходных физико-химических условиях является исключительно четырехвалентным катионом. По всем другим физико-химическим константам эти радиоактивные элементы довольно близки, что определяет их сходные миграционные свойства в зависимости от окислительно-восстановительного потенциала минералообразующей среды. В частности, в эндогенных процессах эти элементы активно участвуют в изоморфных реакциях друг с другом, а также кальцием, калием, ванадием, скандием, иттрием и редкими землями.

В хондритах содержание урана $1 \cdot 10^{-6}$ %, тория – $4 \cdot 10^{-6}$ %; отношение тория к урану – 4. С увеличением щелочности пород концентрации этих элементов заметно возрастают. Так в сиенитах концентрация урана составляет $3,5 \cdot 10^{-4}$ %, в то время как содержание тория возрастает до $1,8 \cdot 10^{-3}$ %. Литосферный кларк урана оценивается в $2,7 \cdot 10^{-4}$ %, тория – в $9,6 \cdot 10^{-4}$ %; отношение тория к урану незначительно превышает 3,5.

Среди собственных минералов урана выделяются оксиды: уранинит (UO₂); ванадаты: тьюмунит (CaU₂[VO₄]₂O₄·8H₂O), карнотит (K₂U₂[VO₄]₂O₄·3H₂O); фосфаты: отунит (CaU₂[PO₄]₂O₄·8H₂O), торбернит (CuU₂[PO₄]₂O₄·12H₂O). Содержание урана в этих промышленно значимых минералах составляет 35 – 90 %. Кроме того, уран присутствует в акцессорных минералах – цирконе, бадделеите, пирохлоре, перовските, апатите, сфене, редкоземельных элементах. Содержание урана в породообразующих минералах – оливинах, пироксенах, слюдах, карбонатах, титаномагнетите – крайне низкие – десятые и чаще сотые грамм на тонну [5, 6].

В отличие от урана торий представлен двумя собственными минералами: оксидом урана – торинитом (ThO₂) и силикатом – торитом (ThSiO₄). Кроме тория (10 – 20 %), эти минералы содержат уран в довольно значительных количествах (10 – 15 %), а также редкоземельные элементы. Довольно высокие содержания тория отмечены в монаците и лопарите – акцессорных минералах щелочных пород. Отмечено также присутствие тория в породообразующих минералах щелочных пород и карбонатитах, где уран и торий образуют непрерывный изоморфный ряд UO₂ – ThO₂.

Особенности распределения урана и тория в породах щелочно-карбонатитового комплекса КМА

Концентрация урана и тория определены во всех типах пород комплекса методом ICP MS. Средние их

значения для пироксенитов, силикокарбонатитов, мелано- и лейкокарбонатитов, нельсонитов и щелочных сиенитов близки, однако размах варьирования существенно различен (табл. 2). Наибольшая вариабильность содержаний радиоактивных элементов ($n \cdot 10^{-4}$) свойственна щелочным пироксенитам, наименьшая – карбонатитам и щелочным сиенитам. Важным параметром радиогеохимического фона ассоциации щелочных ультрамафитов и карбонатитов является устойчиво высокое торий-урановое отношение (1,9 – 4,28).

Одним из главных концентраторов урана и тория в щелочных ультрамафитах и карбонатитах являются акцессорные минералы: циркон, апатит, сфен (табл. 3). Особый интерес представляет анализ распределения урана и тория в апатите из карбонатитов. Акцессорный циркон распространён в породных ассоциациях крайне ограниченно, и радиогеохимический фон обязан здесь своему существованию, главным образом, апатиту, сфену и, в меньшей степени, порообразующим минералам. Радиоактивность апатита имеет отчётливую ториевую направленность при весьма широких колебаниях содержаний урана и тория [7].

Несмотря на близость физико-химических свойств урана и тория, отмечается устойчивое фракционирование этих элементов в магматическом процессе. Важно отметить, что особенности распределения урана и тория в апатите в целом согласуются с поведением радиоактивных элементов в самих породах карбонатитового комплекса, что может служить одним из критериев единства магматического источника для всей породной ассоциации полифазных карбонатитовых интрузий. При этом рост отношения тория к урану отражают фракционную кристаллизацию минералов карбонатитового комплекса.

Концентрации урана и тория достигают довольно высоких значений в фоскоритах и ряде карбонатитов. Главным процессом концентрирования радиоактивных элементов является кристаллизационная дифференциация. Отношение Th/U, которое характеризует степень фракционирования радиоактивных элементов, закономерно увеличивается в процессах дифференциации щелочной системы – от хондритовых значений в высокомагнезиальных недифференцированных магмах до существенно более высоких в поздних продуктах эволюции в карбонатитах [8, 9, 10].

Таблица 2

Распределение урана и тория в породах дубравинского комплекса ($N \cdot 10^{-4}\%$)

Породы	Количество определений	U			Th			Th/U
		min	max	mid	min	max	mid	
Щелочные пироксениты	14	1,92	7,14	4,22	6,88	12,46	10,82	2,56
Апапироксенитовые метасоматиты	5	1,77	6,62	3,44	6,25	11,5	10,42	3,02
Щелочные сиениты	4	3,68	1,93	2,32	7,14	10,84	7,46	3,21
Нордмаркиты	4	2,25	6,65	4,65	6,22	14,26	11,4	2,45
Щелочные граниты	3	3,26	5,18	4,82	5,88	11,34	9,18	1,90
Силикокарбонатиты	7	1,61	3,38	2,25	5,45	11,22	9,64	4,28
Нельсониты	5	1,88	4,12	3,16	6,22	12,12	9,68	3,06
Мелакарбонатиты	8	1,75	5,12	3,14	5,68	13,06	11,12	3,54
Лейкокарбонатиты	9	1,88	4,85	2,88	6,04	11,14	9,64	3,34

Таблица 3

Содержание урана и тория в минералах дубравинского комплекса ($N \cdot 10^{-4}\%$)

Минералы	Количество определений	U			Th			Th/U
		min	max	mid	min	max	mid	
Щелочной пироксен	4	0,008	0,071	0,032	0,014	0,066	0,049	1,53
Щелочной амфибол	4	0,001	0,069	0,042	0,005	0,065	0,048	1,14
Кальцит	6	0,0033	0,12	0,009	0,007	0,22	0,0024	2,67
Микроклин	4	0,0045	0,009	0,012	0,022	0,081	0,06	5,0
Биотит	5	0,0065	0,016	0,0085	0,034	0,094	0,045	5,2
Апатит	14	0,025	0,064	0,049	0,08	0,22	0,14	2,8
Сфен	6	0,025	0,058	0,042	0,055	0,14	0,12	2,2

Заключение

Основными источниками промышленных скоплений радиоактивных элементов являются конечные продукты кристаллизации щелочных пород – пегматиты, а также многочисленные метасоматические (скарны, альбититы) и жильные (кварцевые, карбонатные, флюорит-баритовые) образования. Значительные скопления урана и тория отмечены в осадочно-органогенных (фосфориты, угли, битумы, ураноносные песчаники, метаморфизованные конгломераты) образованиях. В настоящее время учеными-геохимиками обращено внимание на пирохлоровые карбонатиты, как возможные источники радиоактивных элементов, где уран и торий присутствуют в редкометаллических акцессорных минералах – перовските, пирохлоре, апатите, сфене [1, 11]. В качестве примера может служить мезозойская Гулинская щелочно-карбонатитовая магматическая система на севере Сибирской платформы, где апатитовые нефелиновые сиениты отличаются весьма высокими концентрациями радиоактивных элементов, приближающимися к промышленно значимым ($U - 36,07 \cdot 10^{-4} \%$, $Th - 134,9 \cdot 10^{-4} \%$, [1]). Иное положение характерно для протерозойских щелочно-карбонатитовых комплексов КМА и Украинского щита, где значительных концентраций радиоактивных элементов не происходит. Кроме того, если отношение тория к урану в породах дубравинского комплекса КМА вполне соответствует хондритовому, как и щелочных породах и карбонатитах Гулинского массива Полярной Сибири, то в аналогичных породах черниговского комплекса Украинского Приазовья это отношение в пользу урана. Этот элемент устойчиво преобладает над торием практически во всех породных ассоциациях, начиная с оливинитов и щелочных пероксенитов и заканчивая севиитами, альвикитами и фоскоритами [12, 13].

Другим вероятным механизмом, вызвавшим фракционирование урана и тория, может быть частичное плавление мантии в условиях различных глубин. Менее глубинный характер щелочного магматизма северо-западной части Воронежского кристаллического массива (район КМА), по сравнению с Маймеча-Котуйской провинцией Полярной Сибири [1, 14], подтверждается отсутствием супервысокомagneзических высокотемпературных пород маймечитового состава и, как следствие, более низким уровнем накопления радиоактивных элементов. Отличие в соотношениях тория и урана в щелочных породах и карбонатитах КМА и Украинского Приазовья, по-видимому, связано с неоднородностью древнего мантий-

ного источника, а именно, с аномальным обогащением ураном мантийного вещества, ответственного за формирование украинских щелочных пород и карбонатитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Когарко, Л. Н. Условия накопления радиоактивных металлов в процессах дифференциации ультраосновных щелочно-карбонатитовых формаций / Л. Н. Когарко // Геология рудных месторождений, 2014. – Т. 56. – № 4. – С. 262–271.
2. Бочаров, В. Л. Апатитоносные карбонатиты КМА / В. Л. Бочаров, С. М. Фролов. – Воронеж: Изд-во «Петровский сквер», 1994. – 123 с.
3. Бочаров, В. Л. Апатитоносность карбонатитового массива КМА / В. Л. Бочаров, В. В. Багдасарова, В. И. Белых // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1986. – № 9. – С. 81–88.
4. Бочаров, В. Л. Апатит-магнетит-силикатные руды Дубравинского карбонатитового месторождения КМА / В. Л. Бочаров // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2008. – № 1. – С. 94–103.
5. Бочаров, В. Л. Геохимия щелочно-карбонатитового комплекса КМА / В. Л. Бочаров // X семинар «Геохимия магматических пород»: тез. докл. – М.: ГЕОХИ АН СССР, 1984. – С. 21–23.
6. Бочаров, В. Л. Апатитоносные карбонатиты КМА и особенности распределения в них редких элементов / В. Л. Бочаров // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2008. – № 2. – С. 140–151.
7. Романчев, Б. П. Генетические типы апатита Дубравинского массива КМА / Б. П. Романчев, В. Л. Бочаров. – Геохимия. – 1990. – № 7. – С. 1047–1052.
8. KEPLER H. Role of fluids in transport and fractionation of uranium and thorium in magmatic processes / H. Keppeler, P. J. Wyllie // Nature, 1990. – V. 248. – P. 531–533.
9. KLEMMER S. Trace element partitioning between apatite and carbonate melt / S. Klemme, C. Dalpu // Amer. Miner., 2003. – V. 88. – P. 639–646.
10. Ланда, Э. А. Апатитовые месторождения карбонатитовых комплексов / Э. А. Ланда, Л. С. Егоров. – М.: Недра, 1974. – 144 с.
11. Кривдик, С. Г. Петрология щелочных пород Украинского щита / С. Г. Кривдик, В. И. Ткачук. – Киев: Наукова думка, 1990. – 408 с.
12. Кривдик, С. Г. О связи карбонатитового и кимберлитового магматизма (на примере докембрийского карбонатитового комплекса Приазовья) / С. Г. Кривдик // Геохимия и рудообразование, 1980. – Вып. 8. – С. 66–78.
13. Глевасский, Е. Б. Докембрийский карбонатитовый комплекс Приазовья / Е. Б. Глевасский, С. Г. Кривдик. – Киев: Наукова думка, 1981. – 228 с.
14. ERKSSON, S. Age of carbonate and phosphorite magmatism of the Phalaboro complex (South Africa) // Chem. Geol. – 1984. – Vol. 46. – № 2. – P. 291–299.

Воронежский государственный университет

Бочаров В. Л., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии
E-MAIL: GIDROGEOL@MAIL.RU
Тел.: 8(473) 2- 208-980

VORONEZH STATE UNIVERSITY

BOCHAROV V. L., DOCTOR OF GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES, PROFESSOR HEAD OF THE DEPARTMENT OF HYDROGEOLOGY, ENGINEERING GEOLOGY AND GEOECOLOGY
E-MAIL: GIDROGEOL@MAIL.RU
TEL.: 8 (473) 2 - 208-980