

РАДИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЩЕЛОЧНЫХ ИНТРУЗИВОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ АРМЯНСКОЙ ССР

Особенности распределения в щелочных породах радиоэлементов по сравнению с гранитоидами изучены недостаточно. Принято было считать (А. Е. Ферсман, В. М. Гольдшмит), что массивы нефелиновых и щелочных сиенитов по сравнению с кислыми породами заметно обеднены радиоэлементами. В последнее время появились работы о распределении урана и тория в щелочных породах Ловозерского массива (Т. В. Сапрыкина, 1959; В. И. Герасимовский, 1960; К. А. Власов, М. В. Кузьменко, Е. М. Еськова, 1959), Ишимского комплекса (А. А. Смыслов, 1958), в щелочных породах Урала (Е. М. Еськова, Д. А. Минеев, Н. Г. Минеева, 1962), Северного Тянь-Шаня (Л. Л. Леонова и др., 1961, 1963) и массива Иллимуссак в Гренландии (Соренсен, 1958). В указанных работах высказывается мнение о заметной обогащенности щелочных комплексов ураном, торием и радием. Проведенное нами совместно с М. А. Савченко радиогеохимическое изучение пород сложного Мегринского плутона позволило высказать мнение о заметной обогащенности нефелиновых и щелочных сиенитов по сравнению с гранитоидами как ураном, так и торием (Меликсетян, 1961).

С целью дальнейшего обсуждения этого вопроса автором проведены радиогеохимические исследования щелочных интрузий центральной Армении, являющихся типичными представителями базальт-фонолитовой серии.

Краткая характеристика щелочных интрузивов

Щелочные интрузии центральной части Армянской ССР приурочены к бортовой части Севано-Ширакского палеогенового геосинклинального прогиба, входящего в складчатую зону Центральной Армении. Они представлены Тежсарским вулканогенно-интрузивным комплексом, Амзачиманской, Бундукской, Гарнасарской, Ачаджурской интрузиями щелочных и субщелочных пород. Геологии, строению, петрографии этих интрузивов посвящены специальные работы В. Н. Котляра (1958), Г. П. Багдасаряна (1962, 1966), поэтому здесь мы лишь вкратце осветим геолого-петрографические особенности этих массивов.

В отличие от представлений предыдущих исследователей в истории развития магматизма Севано-Ширакского синклиория автор данной статьи формирование калиевой щелочно-сиенитовой формации приурочивает ко времени вступления области в орогенный этап развития на границе верхнего эоцена—олигоцена и объединяет щелочно-сиенитовые и субщелочные гранитоидные интрузивы Памбака в единый раннеорогенный верхнеэоцен-нижнеолигоценовый многофазный щелочной комплекс.

В структурном отношении он контролируется зоной сопряжения Анкавано-Сюникского глубинного разлома СЗ простирания с поперечным Уляшикским разломом на границе с жестким блоком Цахкуняцского горст-антиклинория, сложенного древними (P_{21} — P_{22}) метаморфическими породами.

Тежсарский эффузивно-интрузивный комплекс являет собой яркий пример интрузий центрального типа. Он имеет в плане эллиптическую форму, площадью более 60 кв. км, и сложен следующими кольцевыми и неполнокольцевыми структурными элементами: 1) внешней подковообразной конической интрузией щелочных сиенитов; 2) неполнокольцевыми дайками лейцитовых фонолит-порфиров; 3) внутрикольцевым барьером, сложенным центральными вулканическими породами; 4) центральным штоком псевдолейцитовых, нефелиновых и щелочных сиенитов; 5) периферическим штоком поздних субщелочных гранитоидов.

Проведенными исследованиями установлено, что возникновение кольцевых и конических структур (сходящихся на глубине 6—8 км в фокусах магматического резервуара) обязано кальдерообразному проседанию крупного вулкана центрального типа и последовательному внедрению, вслед за завершением эксплозивной фазы, кольцевых даек лейцитовых фонолит-порфиров, а после некоторого перерыва—центрального штока—затем конической и сателлитовых интрузий щелочных и субщелочных сиенитов и в конце—трещинной интрузии порфировидных кварцевых сиенитов и граносиенитов.

Центральные вулканические породы слагают толщу, мощностью около 600 м, отделяющую центральный шток от конической интрузии. Вулканогенная толща имеет асимметрично-мульдообразное залегание под углом 30—45° и сложена, по Г. П. Багдасаряну (1962), тремя равными по мощности свитами: а) трахиандезитовой; б) трахитовой и в) фонолитовой. В составе указанных свит преобладают вулканические брекчии, лавобрекчии и агломераты, а лавовые разности и дайки играют подчиненную роль. Субвулканические образования представлены редкими дайками базальтов, тефритов, бостонитов и лампрофиров, а также крупными дайками лейцитовых фонолит-порфиров.

Центральный интрузив имеет концентрически-зональное строение—от псевдолейцитовых сиенитов по периферии через нефелиновые к щелочным сиенитам во внутренних участках. Здесь же развиты небольшие штоки нордмаркитов. В пределах центрального штока широким развитием пользуются довольно редкие типы щелочных пород: эндоконтактные гибридные, меланитовые, сфеновые, флюоритовые, анальцимовые, цеолитовые, канкринитовые, содалитовые, нефелиновые сиениты, а также жильная серия, представленная нефелин-сиенитовыми порфирами, нефелиновыми и альбититовыми аплитами, псевдолейцитовыми тингуантами, сельсвергитами и керсантитами. Среди пегматитов выделяются полевошпатовые и фельдшпатоидные. Щелочные гидротермалиты представлены флюорит-биотитовыми брекчированными породами, а метасоматиты—мусковитизированными и альбитизированными нефелиновыми сиенитами.

Конический подковообразный интрузив представлен нефелинсо-держажими щелочными, субщелочными сиенитами, реже монцонитами и кварцевыми сиенитами, имеющими совершенно постепенные взаимопереходы. Архошанская сателлитовая интрузия прорывается порфировидными граносиенитами (Б. Меликсетян, Р. Геворкян, 1963).

Бундукский и Ачаджурский сателлитовые интрузивы имеют вытянутую дайкообразную форму и представлены двумя субфазами: а) субщелочными амфибол-биотитовыми сиенитами, монцонитами и эндоконтактовыми габбро-сиенитами; б) лейкократовыми розовыми сиенитами. Для интрузивов характерны явления гибридизма и сиенитизации вмещающих среднезюеновых андезитовых порфиритов. По данным Р. Г. Геворкяна (1965) Бундукская интрузия прорывается дайками Гарнасарской интрузии щелочных трахитов (арменитов).

Гарнасарская пластовая интрузия представлена однородными щелочными трахитами (иногда анальцимовыми и цеолитовыми разностями), переходящими от периферии тела к центру в среднезернистые типичные щелочные сиениты.

Амзачиманская и Фиолетовская интрузии порфировидных субщелочных гранитов являются заключительной фазой верхнеэоцен-нижнеолигоценного комплекса. Представлены периферическим штоком со сравнительно однообразными порфировидными, мнуролитовыми граносиенитами, среди которых, особенно в эндоконтактах,

развиты эплиты, эплит-пегматиты и пегматиты нескольких генераций. Характерной особенностью интрузивов является присутствие в породах значительного количества в различной степени переработанных ксенозитов.

Для химизма Тежсарского вулканоплутонического комплекса характерны: заметная недосыщенность кремнеземом, пересыщенность глиноземом, при повышенной, особенно калиевой щелочности ($\text{Na}_2\text{O} : \text{K}_2\text{O} = 1,1-2$), высокой железнитости ($\text{FeO} : \text{MgO} > 2-5$) и несколько повышенной известковитости ($\text{CaO} > \text{MgO}$). В целом щелочносинитовая интрузивная формация Памбака относится к нормальному ряду с коэффициентом апатитности, равным 0,7—0,85 (миаскитовый тип), а в генетическом аспекте к типичным вулканоплутоническим ассоциациям, производным щелочной оливин-базальтовой магмы. В ходе эволюции первичной щелочной оливин-базальтовой магмы, особенно в конечной стадии, значительная роль принадлежит процессам взаимодействия с породами гранитно-метаморфического субстрата и карбонатными породами мела. Особенностью эволюции базальт-фенолитовой серии Памбака является непрерывное возрастание кремнекислоты как в вулканический этап (49,0—55%), так и в интрузивный (55—68%) с соответственным понижением степени недосыщенности кремнеземом (Q от $-10 \div 20$ до $+10 \div 20$). Параллельно с возрастанием в ходе дифференциации SiO_2 щелочность достигает максимума к концу вулканического этапа, а в интрузивный—она понижается, причем темпы понижения Na_2O более высокие, чем K_2O . На фиг. 1 показано поведение K_2O , Na_2O , SiO_2 и CaO в зависимости от индекса дифференциации (параметр Q , А. Н. Заварицкого) и возрастания общей кремнекислотности в ходе эволюции Памбакского щелочного комплекса.

Особенности распределения радиоэлементов в щелочных эффузивных и интрузивных породах

Как известно, в магматическом процессе геохимическая судьба урана и тория определяется поведением щелочей и летучих, имеет много общих черт и тесно связана с поведением иттрия и редких земель.

Для выяснения геохимии урана, тория и радия мы располагали более 130 люминесцентными определениями урана, 65 химическими определениями тория и 10 определениями радия и химическими анализами суммы редких земель и иттрия. Анализировались как разности щелочных пород, так и минералы, отобранные из главных типов пород и пегматитов. Анализы выполнялись в лабораториях УГ СМ Арм. ССР (зав. лабораторией Н. Атоян).

В табл. 1 и 2 приведены данные по распределению урана, тория и радия в щелочных породах Тежсарского комплекса. Рассмотрим распределение элементов в различных возрастных группах щелочных пород.

Средние содержания радиоэлементов в целом по Тежсарскому комплексу составляют: уран— $3,75 \cdot 10^{-4}$, торий— $2,75 \cdot 10^{-3}$ и радий $1,2 \cdot 10^{-8}\%$. По сравнению с кларком в кислых породах щелочные породы Тежсарского комплекса в 1,5 раза обогащены ураном ($2,5 \cdot 10^{-4}\%$) и торием ($1,8 \cdot 10^{-4}\%$) и в 10 раз радием— $1,2 \cdot 10^{-10}\%$ (Виноградов, 1962).

Концентрации радиоэлементов по сравнению с кларками изверженных пород обогащены в еще большей степени. По данным Еськовой (1962), щелочные породы Урала содержат несколько меньше урана— $3,2-4 \cdot 10^{-4}\%$ и тория $7-19 \cdot 10^{-4}\%$.

Мегринские щелочные породы более обогащены ураном— $5,6 \cdot 10^{-4}\%$, чем торием— $2,5 \cdot 10^{-3}\%$. Это видно по различному торий-урановому отношению: Мегри—4,5, Тежсар—7,5.

Щелочно-базальт-лейцит-фонолитовая серия характеризуется несколько повышенной радиоактивностью. Среднее содержание урана— $2,75 \cdot 10^{-4} \%$, тория— $1,75 \cdot 10^{-3} \%$ при торий-урановом отношении, равном 6,5. От калиевых базальтов и трахиандезитов и их туфо- и лавобрекчий к трахитам и эпилейцитовым фонолит-порфирам потоков и даек возрастает содержание урана ($3-4 \cdot 10^{-4} \%$) и тория ($2-3 \cdot 10^{-3} \%$) и понижается торий-урановое отношение (от 10—6 до 5). По сравнению с другими разностями эффузивов трахиты и фонолиты с вкрапленниками калишпата и флюорита и эпилейцитовые сиенит-порфиры даек более радиоактивны.

Конический интрузив

Коническая интрузия характеризуется несколько более высокой радиоактивностью, обусловленной заметным увеличением содержания тория. Так, среднее содержание урана в щелочных сиенитах и жильных дифференциатах такое же, что и в эффузивном комплексе $2,75 \cdot 10^{-4} \%$, а содержание тория возрастает в 1,5 раза— $2,25 \cdot 10^{-3} \%$ при колебании содержания от 2 до $4 \cdot 10^{-3} \%$. Резко возрастает и Th/U отношение (11,0). По сравнению с материнскими породами микросиениты и полевошпатовые жилы несколько обогащены как торием, так и ураном.

Центральный интрузив

Центральный интрузив, как указывалось, характеризуется концентрически-зональным расположением отдельных разновидностей щелочных пород. Средняя часть массива сложена щелочными сиенитами, а периферические—нефелиновыми сиенитами, сменяющимися непосредственно в эндоконтактной зоне псевдолейцитовыми и обогащенными нефелином сиенитами с участками сиенитизации.

Щелочные сиениты характеризуются изменчивым содержанием урана и тория. Среднее содержание урана— $4,5 \cdot 10^{-4} \%$ (при колебании от 2 до $6 \cdot 10^{-4} \%$), тория— $2,5 \cdot 10^{-4} \%$ (от 1 до $4 \cdot 10^{-3} \%$). Характерно довольно низкое торий-урановое отношение—5,5. Содержание радия довольно высокое— $1,35 \cdot 10^{-9} \%$. Относительная концентрация радиоэлементов, выражающаяся отношением Th : U : Ra равна $2,3 \cdot 10^6 : 3,3 \cdot 10^5 : 1$; отношение Ra : U равно $0,3 \cdot 10^{-6}$, что указывает на радиоактивное равновесие продуктов распада урана. Как видно из табл. 1, альбитизированные и среднезернистые разности щелочных сиенитов обогащены радиоэлементами в большей степени, чем крупнокристаллические.

Нефелиновые сиениты по сравнению с щелочными сиенитами характеризуются более высокой щелочностью, особенно натровой. В них отмечается некоторое понижение содержания урана до $4 \cdot 10^{-4} \%$ и увеличение концентрации тория $3 \cdot 10^{-3}$ (в пределах от 2 до $5 \cdot 10^{-3} \%$). Торий-урановое отношение возрастает в среднем до 7,5, колеблясь в широких пределах от 25 до 2. Среднее содержание радия здесь несколько ниже $1,0 \cdot 10^{-9} \%$. Отношение Ra : U составляет $0,25 \cdot 10^{-6} \%$. Концентрация урана в нефелиновых сиенитах возрастает в тех разностях, которые подверглись аутометасоматическим изменениям. В содалитизированных, канкринитизированных и анальцимовых сиенитах урана всегда больше ($3-4 \cdot 10^{-4} \%$), чем в нормальных ($2 \cdot 10^{-4} \%$), причем максимальной концентрации он достигает в альбитизированных ($1,8 \cdot 10^{-3} \%$).

Таблица 1

Содержание урана и тория в щелочных породах и субщелочных гранитоидах
Центральной части Армянской ССР

1	Разновидности пород	Кол-во анализов	Содержание в %		Отношение Th/U
			U · 10 ⁻⁴	Th · 10 ⁻³	
1	2	3	4	5	6
Эффузивный щелочной комплекс					
T-611	Кали-базальт	1	1	1	10.0
T-17	Щелочной трахиандезит	1	2	1	5.0
T-7a	Щелочной трахит	1	3	2	6.7
T-16	Эпилейцитовый феолизит-порфир	1	4	3	7.5
T-22	Эпилейцитовый сиенит-порфир (дайка)	1	3.5	2	5.5
	Среднее из 4 анализов	5	2.75 · 10 ⁻⁴	1.75 · 10 ⁻³	6.5
Конический щелочной интрузив					
T-18	Щелочной сиенит	1	2	1	5.0
T-8	Нефелиновый сиенит	1	3	2	
T-9	Пегматит полецошпатитовый	1	2	3	15.0
T-49	Щелочной микросиенит	1	3	4	13.3
	Среднее из	4	2.5 · 10 ⁻⁴	2.25 · 10 ⁻³	11.0
Центральный интрузив					
а) Породы					
T-206	Сиенитизированный порфир	1	8	8	10.0
T-11	Гибридная пятнистая порода	2	4	2	5.0
T-20	Щелочной сиенит, среднезернистый	1	6	4	6.6
T-20м	Щелочной сиенит, крупнозернистый	1	2	1	5.0
T-2	Щелочной сиенит, альбитизированный	1	6	1.5	2.5
		6	4.5 · 10 ⁻⁴	2.5 · 10 ⁻³	5.5
T-26	Нефелиновый сиенит нормальный	2	2	5	25.0
T-19	Нефелиновый сиенит пегматоидный	4	2	3	15.0
T-26м	Нефелиновый сиенит альбитизированный	1	12	2	1.8
T-8	Нефелиновый сиенит среднезернистый	2	3	1	3.3
		9	4.0 · 10 ⁻⁴	2.8 · 10 ⁻³	7.5
T-34	Канкринитовый нефелиновый сиенит	1	2	2	10.0
T-35	Содалитовый нефелиновый сиенит	1	4	4	10.0
T-36	Анальцитомый нефелиновый сиенит	1	3	3	10.0
T-3	Псевдолейцитовый нефелиновый сиенит	2	3	2.5	8.1
T-35м	Псевдолейцитовый сиенит	1	7	4	5.7
T-5-25	Богатый нефелином сиенит	5	3.5	2.5	7.1
T-24	Сфеновый нефелиновый сиенит	1	12	8	6.7
T-1	Меланитизированный нефелиновый сиенит	1	8	8	10.0
T-37	Нордмаркиты и кварцевые сиениты	2	2.5	2.5	6.0
		15	4.5 · 10 ⁻⁴	3.5 · 10 ⁻³	7.4
б) Жильные микросиениты					
T-12	Аплитовый серый альбитит	1	6	2	3.7
T-7	Щелочный лейкократовый микросиенит	1	2	1	5.0
T-15	Нефелиновый лейкократовый сиенит	1	3	3	10.0
		3	4.0 · 10 ⁻⁴	2.0 · 10 ⁻³	6.5

1	2	3	4	5	6
в) Пегматиты					
T-14	Безнефелиновый пегматит	5	3,5	5,5	15,7
T-10	Амфибол-меланитовый пегматит	2	4	4	10,0
T-30	Нефелиновый пегматит с содалитом	5	5	7	14,0
T-32	Альбитизированный пегматит	6	8	9	11,3
Среднее из		18	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-3}$	13,0
г) Измененные породы					
T-33	Флюорит-биотитовая порода	1	12	15	12,5
T-33м	Флюорит-биотит-альбитовая порода	1	25	9	3,6
T-201	Гидротермально измененный сиенит	1	17	4	2,3
	Мусковитизированный сиенит	2	8	4	5,0
Среднее из		5	$15 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-3}$	5,5
7-27	Дайка меланократового монацита	1	2	3	15,0
Бундукский интрузив					
Б-79	Среднезернистый сиенит	2	3	4	13,3
Б-82	Амфибол-биотитовый сиенит	1	1	1	10,0
Б-83	Биотитовый щелочной сиенит	1	3	2	6,6
Б-80	Щелочной сиенит крупнозернистый	1	1	1	10,0
Б-81	Пегматоидный лейкосиенит	1	6	3	5,0
Б-85	Эндоконтактовый монацит	2	2	1	5,0
Б-86	Альбитизированный пегматит	2	7	6	8,6
Среднее из		12	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	8,3
Гарнасарский массив					
Г-131	Щелочной трахит, мелкозернистый	2	1	1	10,0
Г-211	Щелочной сиенит среднезернистый	1	2	1	5,0
Среднее из		3	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	7,0
Ачаджурский интрузив					
A-133	Щелочной сиенит, пегматоидный	2	1	1	10,0
Амзачиманский интрузив					
Г-70	Порфиroidный граносиенит	8	2	1	5,0
Г-57	Порфиroidный гранит, альбитизированный	1	15	4	2,7
Г-61	Среднезернистый кварцевый сиенит	2	2	2	10,0
Г-68	Гранодиорит, эндоконтактовый	1	6	3	5,0
Г-63	Микролитовый гранит	1	9	2	2,2
Г-74	Контаминированный гранит	1	1	1	10,0
Г-60	Гранит-порфир, дайка	1	1	1	10,0
Г-59	Лампрофир керсантитового состава	1	1	1	10,0
Г-72	Пегматит, зональный	4	1,5	2	13,0
Г-52	Аплит-пегматит	2	1	2	20,0
Г-54	Аплит, жильный	3	1	1	10,0
Среднее из		25	$2,5 \cdot 10^{-4}$	1,5	6,0

Примечание. Содержание урана приведено по данным двухкратных люминесцентных анализов. Точность $\pm 10-20\%$. Чувствительность $1,10-4\%$. Торий определялся химическим весовым методом. Точность $5-10\%$. Чувствительность $0,001\%$.

Пегматиты характеризуются наиболее высоким содержанием тория (до 0,01%) и максимальным торий-урановым отношением—12 (пределы 10—25). Преимущественное накопление тория в щелочных пегматитах Тежсарского комплекса является необычным и весьма характерным. Радиохимические исследования в Мегринском плутоне показали четко выраженную тенденцию к накоплению урана в пегматитах, характеризующихся очень низким торий-урановым отношением—2—4 (Меликсетян, 1961).

Исследованиями щелочных пегматитов Тежсара установлено, что главная масса тория выделяется в виде акцессорного торита и ториянита, а уран рассеивается в ториевых и кальциевых акцессориях. Среди щелочных пегматитов сложно-замещенные альбитизированные разновидности характеризуются высоким содержанием как урана ($8 \cdot 10^{-4}\%$), так и тория ($9 \cdot 10^{-3}\%$). Причем, как правило, безнефелиновые пегматиты по сравнению с нефелиновыми обогащаются ураном в несколько большей степени, чем торием.

Щелочные гидротермалиты и метасоматиты как по содержанию урана, так и по содержанию тория характеризуются исключительно высокими содержаниями, превышающими средние содержания радиоэлементов в Тежсарском комплексе примерно в 5—10 раз.

Наибольший интерес представляют: а) мусковитизированные, альбитизированные сиениты в виде зон и полос, характеризующиеся присутствием $8 \cdot 10^{-3}\%$ урана и $4 \cdot 10^{-3}\%$ тория при $\text{Th/U}=5$; б) флюорит-биотитизированные, часто брекчированные сиениты и зоны, содержащие в среднем $1,8 \cdot 10^{-3}\%$ урана и $9,0 \cdot 10^{-3}\%$ тория с Th/U -отношением, равным 5.

Поздние меланократовые дайки монцонитов и керсантитов характеризуются наименьшими содержаниями урана ($2 \cdot 10^{-4}\%$) и тория ($3 \cdot 10^{-3}\%$) при довольно высоком торий-урановом отношении—15.

Таким образом, в распределении радиоэлементов в Центральном штоке наблюдаются элементы горизонтальной зональности, причем от центра к периферии отмечается примерно двукратное обогащение ураном и торием при некотором возрастании торий-уранового отношения.

Субщелочные сиениты Бундукского интрузива

Сателлитовая интрузия Тежсарского комплекса является, вероятно, более поздней субфазой и характеризуется радиоактивностью, близкой к коническому интрузиву, но более низкой, чем породы центрального штока. Среднее содержание по интрузиву составляет: урана— $3 \cdot 10^{-4}\%$, Th— $2,5 \cdot 10^{-3}\%$ при довольно высоком Th/U -отношении—8,3. Среднезернистые и биотитовые субщелочные сиениты в 2—3 раза и более обогащены радиоэлементами, чем крупнозернистые амфибол-биотитовые сиениты. Наиболее обогащены розовые пегматоидные лейкосиениты, являющиеся поздней дополнительной инъекцией (U — $6 \cdot 10^{-4}\%$, Th— $3 \cdot 10^{-3}\%$) и содержащие ураноторит и давидит.

Как всегда, альбитизированные сиениты и пегматиты имеют высокий радиохимический фон (U — $7 \cdot 10^{-4}\%$, Th— $6 \cdot 10^{-3}\%$) и низкое торий-урановое отношение (5,0).

Гарнасарский и Ачаджурский интрузивы

Указанные массивы характеризуются довольно однообразным составом, сравнительно пониженной щелочностью, весьма обеднены радиоэлементами (U — 1 — $2 \cdot 10^{-4}\%$, Th— $1 \cdot 10^{-3}\%$) и имеют высокое торий-урановое отношение—7,0—10,0.

Порфировидные граносиениты и граниты Амзачиманского массива являются завершающей фазой Памбакского щелочного комплекса. В целом интрузив характеризуется пониженным содержанием радиоэлементов и в преобладающем большинстве проб содержание их варьирует в пределах уран— $1-2 \cdot 10^{-4}\%$, торий— $1-2 \cdot 10^{-3}\%$. Однако отдельные разновидности пород, характеризующиеся слабой контаминированностью ксенолитами, микрочешуйчатой текстурой, заметным обогащением кварцем и, как правило, альбитизированные, содержат довольно высокие концентрации радиоэлементов ($U-6-15 \cdot 10^{-4}\%$, $Th-3-4 \cdot 10^{-3}\%$), так как в этих разностях встречаются акцессорный ортит, торит и цирколит. Однако в общем балансе роль их невелика. Жильные породы аплитового и пегматитового облика хотя заметно и обогащены ортитом, но по содержанию радиоэлементов не отличаются от пород: уран ($1-2 \cdot 10^{-4}\%$), торий ($1-2 \cdot 10^{-3}\%$). Весьма интересным является тот факт, что ортит из граносиенитов очень резко обеднен U и Th по сравнению с ортитом щелочных пород.

Для субщелочных гранитов характерно в целом высокое торий-урановое отношение, достигающее 10—20, однако в среднем оно составляет 6,0. В направлении к контакту с щелочным комплексом концентрация радиоэлементов возрастает.

Как указывалось, щелочные породы Памбака превышают по концентрации радиоэлементов кларки кислых пород (табл. 2). Интересно, конечно, сравнить содержание урана и тория в Тежсарском комплексе и в щелочных комплексах других регионов. По содержанию урана вулканические породы Памбака очень близки к аналогичным породам юга Сибирской платформы (Т. В. Билибина, В. К. Титов, 1968), в то время как торием они вдвое обогащены. Нефелиновые и щелочные сиениты Памбака почти в 4 раза беднее радиоэлементами чем агпаитовые щелочные породы Ловозера (Сапрыкина, 1959); содержание тех же элементов по сравнению с Ишимскими (Смыслов, 1958) и Вишневогорским массивами (Еськова и др., 1962) вдвое меньше. Как по содержанию урана, так особенно по торию рассматриваемый щелочной комплекс несколько более обогащен радиоэлементами, чем Ильменогорский (Еськова, 1962), Бердяш (Комлев, 1949), юг Сибирской платформы (Билибина, Титов, 1968), Восточная Тува (Абрамович, 1959) и др.

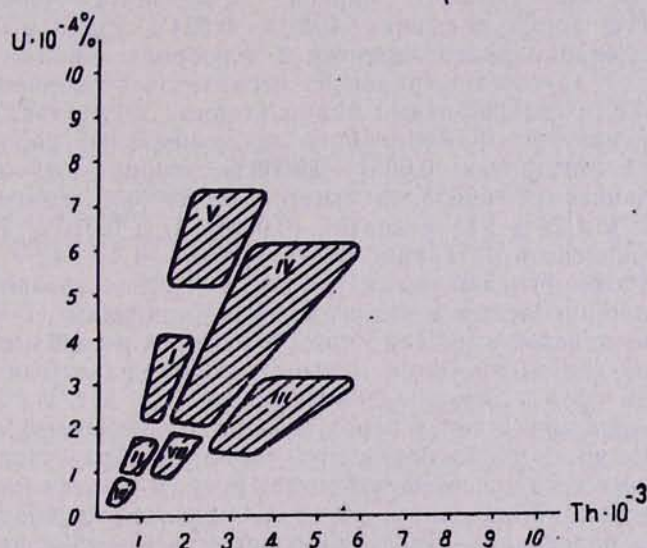
Привлекает внимание высокое торий-урановое отношение Тежсарского комплекса в целом ($Th/U-7,5$), которое в 2,5 раза выше среднего отношения этих элементов в земной коре и большинства указанных щелочных комплексов (1,5—4,5) и близко к Ишиму (7,2). Тежсарский комплекс щелочно-базальтоидной серии относится к категории типов средней радиоактивности, при несколько повышенной их ториеносности.

Л. В. Комлев (1936), подводя итоги многолетних исследований по изучению среднего содержания урана и тория в гранитных массивах СССР, выделил пять основных типов. Однако, как нам представляется, эта диаграмма пригодна и для классификации щелочных комплексов. Так, щелочные породы Тежсара относятся ко второму типу Л. В. Комлева, для которых характерно повышенное содержание урана и тория при отношении $Th/U-6-9,5$. Амзачиманские гранитоиды близки к пятому типу—бедных как ураном, так и торием с Th/U отношением, равным 6. На фиг. 1 выделены типы щелочных пород Армянской ССР по содержанию урана и тория.

Таблица 2

Средние составы радиоэлементов в щелочных породах Центральной Армении

Главные типы пород	Содержание в весовых %			Th/U
	U	Th	Ra	
Эффузивные щелочные породы				
Калиевый щелочной базальт	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	—	10,0
Щелочной трахиандезит	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	—	5,0
Щелочной трахит	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	—	6,7
Лейцитовый фонолит	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$3.0 \cdot 10^{-3}$	—	7,5
Интрузивные щелочные породы				
Псевдолейцитовые сиениты	$5.0 \cdot 10^{-4}$	$3,25 \cdot 10^{-3}$	$1,78 \cdot 10^{-9}$	6,5
Нефелиновые сиениты	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$3.0 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	7,5
Щелочные сиениты—центр. шток	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-9}$	5,5
Щелочные сиениты—конич. интр.	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,25 \cdot 10^{-3}$	н. обн.	11,0
Субщелочные сиениты	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	—	7,0
Нордмаркиты	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	—	10,0
Кварцевые сиениты	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	н. обн.	10,0
Граносиениты	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	6,0
Вогезит-порфиры	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	—	15,0
Среднее по комплексу	$3,75 \cdot 10^{-4}$	$2,75 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	7,5



Фиг. 1. Радиохимические поля щелочных комплексов Армянской ССР.

I. Тежсарский щелочной эффузивный комплекс. II. Гарнасарский массив. III. Бундукский массив. IV. Тежсарский щелочной интрузивный комплекс. V. Мегринский щелочной комплекс. VI. Баргушатские щелочные породы. VII. Субщелочные гранитоиды Амзачиманского массива.

Для понимания геохимии урана и тория в щелочных породах важное значение имеет распределение этих элементов по минералам. В табл. 3 приведены результаты многочисленных химических анализов минералов как главных породообразующих, так и акцессорных из пород и пегматитов.

При рассмотрении содержаний радиоэлементов в главных породообразующих минералах привлекает внимание несколько пониженный, по сравнению с щелочными породами, порядок содержания урана и тория в плагиоклазах, содалите, гастингсита, эгирин-авгита (0,0001—0,0002% урана, следы тория). В то же время, в калишпатах и псевдолейцитовых выделениях содержания урана и тория идентичны таковому в породе. Несомненный интерес представляет почти двукратное, по сравнению с породами, обогащение нефелина ураном (0,0008—0,001%) при пониженном содержании тория (0,001%). Как правило, одноименные минералы из пегматитов более обогащены радиоэлементами. Из породообразующих минералов наиболее обогащены радиоэлементами биотиты (0,0023% U, 0,002% тория). Отношение Th/U в породообразующих минералах очень низкое—0—2,5. В магнетите из пород 0,0002% урана и 0,0005% тория, в то же время магнетиты из пегматитов содержат 0,0019% урана и 0,001% тория.

Акцессорные минералы щелочных пород являются основными концентраторами урана и главными минералами-носителями тория. Среди них выделяются такие распространенные минералы, как меланит, сфен, флюорит, апатит, циркон. В меланитах—0,0021—0,0023% урана, 0,004% тория, в сфенах—0,0013—0,024% урана и 0,016—0,03% тория. Содержание радиоэлементов в флюоритах крайне изменчивое. В отличие от других минералов из пегматитов флюориты характеризуются низкими содержаниями радиоактивных элементов. Наименьшее содержание присуще флюоритам из зон измененных пород. Содержание урана в флюоритах—0,0051—0,0009%, тория—0,01—0,001%. Из других кальциевых минералов отметим ортит из щелочных пород (0,0024% U и 1,28% Th) и апатит (0,003% U и 0,010% Th), причем ортит из граносиенитов крайне беден ураном— $1,4 \cdot 10^{-3}$ и торием—0,21%. Наиболее обогащенными ураном и торием являются циркониевые, тантало-ниобиевые и редкоземельные минералы (1—3% урана и тория) и редко встречающиеся торит, ураноторит и торнит. Меланиты и флюориты характеризуются меньшим торий-урановым отношением (1—3,6), чем сфены, цирконы, апатиты и др. (10—37). Из этого явствует, что главная масса тория пород связана с акцессориями, в то время как большая часть урана приходится на породообразующие минералы.

Приближенные подсчеты показывают, что в безнефелиновых породах на калишпат приходится 50—60% общего содержания урана в породах, на плагиоклаз—5%, темноцветные—10—15%, а остальная часть—30—45% приходится на акцессорные минералы. Только 10% тория приходится на темноцветные минералы породы, остальные 90% связаны с меланитом, сфеном, цирконом и более редким монацитом. В нефелиновых и псевдолейцитовых сиенитах 40—50% урана связано с нефелином, 30—40%—с полевыми шпатами, а остальные 20—30% приходится на темноцветные и акцессорные минералы. Распределение тория аналогичное—главная масса (85—95%) связана с акцессориями. В субщелочных гранитах главная масса урана (около 50—75%) приходится на калишпат и биотит, а тория—на ортит (60—65%) и кальциевые акцессории.

Содержание урана и тория в минералах из пород пегматитов щелочного комплекса*

№ образцов	Минералы	Количество анализов	Содержание в %		Отношение Th/U
			урана	тория	
Породообразующие					
T-8П	Олигоклаз-альбит	2	0.0001	не обн.	—
T-28к	Калиевый полевой шпат	2	0.0004	0.0005	1.25
T-30и	Нефелин из пород	1	0.0008	не обн.	—
T-35и	Нефелин из пегматита	1	0.0009	0.001	1.1
T-37и	Полевой шпат — нефелин	1	0.0010	0.001	1.0
T-3а	Псевдолейцит	1	0.0004	0.001	2.5
T-37с	Содалит	1	0.0001	следы	—
T-33б	Биотит	1	0.0023	0.002	0.9
T-23а	Гастингсит из пород	2	0.0002	следы	—
T-8а	Гастингсит из пегматита	2	0.0003	не обн.	—
T-16э	Эгирин-авигит	1	0.0001	не обн.	—
T-28м	Акцессорные				
	Магнетит из пород	1	0.0002	0.0005	2.5
T-21м	Магнетит из пегматита	2	0.0019	0.001	0.5
T-1ш	Меланит из пород	2	0.0023	0.004	1.8
T-30ш	Меланит из пегматита	1	0.0021	0.004	1.9
T-30ф	Флюорит из пород	1	0.0051	0.010	2.0
T-5ф	Флюорит из пегматита	1	0.0025	0.009	3.6
T-33ф	Флюорит из зоны	1	0.0009	0.001	1.1
T-19с	Сфен из пород	2	0.0013	0.016	12.3
T-21с	Сфен из пегматита	2	0.024	0.030	12.5
T-7а	Апатит из пород	1	0.003	0.010	37.0
T-34и	Циркон из пород	3	0.042	0.45	10.6
T-16и	Циртолит из пород	1	3.0	1.0	0.33
T-4 5	Тантало-ниобаты из пегматита	5	1—3	3—5	3—4
O-1г	Ортит из нефелиновых сиенитов	2	0.0024	1.28	533.0
	Ортит из граносиенитов	1	0.014	0.21	150.0
T-2	Монацит из пород	1	0.3	3.0	10.0
T-12	Редкоземельные минералы	8	0.3—1	0.3—3	3—10

* Анализы выполнены в лаборатории УГ при СМ Арм. ССР, зав. лабораторией Н. Атоян. Уран определялся уранометрическим методом. Точность $\pm 25\%$. Чувствительность 0.0001%. Торий—весовым методом (Остроумова). Точность $\pm 15\%$. Чувствительность—0.001%.

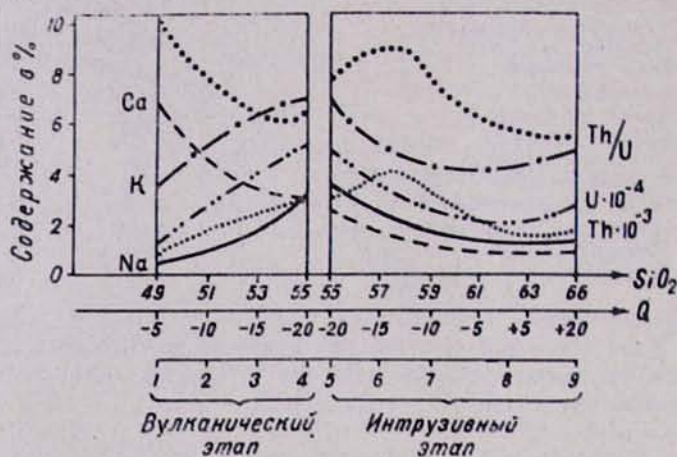
Вопрос о формах нахождения урана в породообразующих минералах еще далек от своего решения. Специальные исследования установили около 6 форм нахождения (Д. Нейерберг, 1955; Смыслов, 1958; Л. В. Таусон, 1959 и др.), причем главная его масса находится в легкоподвижной неизоморфной форме (адсорбированное состояние, атомарное рассеяние и импрегнация). Формы нахождения урана и тория в акцессорных минералах более определены. Близость ионных радиусов тория (Th^{4+} —1.01 Å) и урана (U^{4+} —1.05 Å), с одной стороны, Zr^{4+} (0.87 Å), Y^{3+} (1.06 Å), Ce^{3+} (1.05 Å)—с другой и последних с кальцием (Ca^{2+} —1.03 Å) обуславливает вхождение редкоземельных в структуру кальциевых, редкоземельных и циркониевых минералов, причем компенсационный гетеровалентный изоморфизм имеет «непочечный» характер: в кальцийсодержащих минералах сначала Ca замещается Ce^{3+} , затем Y^{3+} и далее Th^{4+} , U^{4+} , с компенсацией Na^{+} , OH, P, F и др.

Поведение урана и тория в ходе формирования Тежсарского вулcano-плутонического комплекса

Тежсарский вулcano-плутонический щелочной комплекс представляет тот редкий случай, когда поведение урана и тория можно проследить в ходе эволюции щелочной оливин-базальтовой магмы от вулканического этапа к интрузивному, вплоть до конечных продуктов—суб-щелочных гранитоидов.

На диаграмме (фиг. 2) показаны кривые поведения урана и тория, а также щелочей и извести в зависимости от своеобразного хода дифференциации с повышением кремнекислотности и понижением недосыщенности кремнеземом.

Ход дифференциации щелочной оливин-базальтовой магмы в вулканический этап выражается в неуклонном возрастании радиоэлементов от ранних членов-тефритов и трахиандезитов к щелочным трахитам и фонолитам параллельно с повышением щелочности и резким падением CaO . Темпы увеличения содержаний урана и тория от начальных к конечным возрастают соответственно в 5 и 3 раза. Содержание урана и тория в щелочных оливиновых базальтах, как правило, выше, чем кларки для основных пород и основных лав геосинклинального этапа развития Севано-Ширакского синклинория ($\text{U}—0,6 \cdot 10^{-4}\%$; $\text{Th}—0,4 \cdot 10^{-3}\%$) и других регионов, в частности Казахстана и Горного Алтая (Абрамович, Смыслов, 1968).



Фиг. 2. Геохимическое поведение урана тория, калия, натрия и кальция в ходе эволюции Тежсарского щелочного вулcano-плутонического комплекса.

1. Кали-базальт. 2. Трахиандезит. 3. Щелочной трахит.
4. Эпилейцитовый фонолит. 5. Псевдолейцитовый сие-нит.
6. Нефелиновый сиенит. 7. Щелочной сиенит.
8. Нордмаркит. 9. Граносиенит.

Обогащенность щелочно-базальтовой магмы радиоэлементами, являющимися несовместимыми в геохимическом отношении, тесно связана с обогащенностью магмы калием. На наш взгляд, эта особенность щелочно-базальтовой магмы может быть объяснена процессами взаимодействия в гранитно-метаморфическом субстрате, что находит

подтверждение, в частности, в большей обогащенности промежуточных и конечных членов базальт-фонолитовой серии.

Дальнейшая эволюция остаточной лейцит-фонолитовой магмы в интрузивный этап протекает несколько своеобразно. С повышением SiO_2 и понижением щелочности и известковистости от псевдолейцитовых сиенитов к нефелиновым и далее к щелочным сиенитам содержание радиоэлементов снижается, достигая минимума в субщелочных гранитах поздней фазы. В интрузивный этап от нефелин-сиенитовой эвтектики к гранитной концентрация урана и тория понижается вдвое. Эта тенденция более резко проявлена соответственно в щелочных и гранитных пегматитах. Причину такого поведения радиоэлементов следует искать в поведении летучих и в первую очередь фтора, а также в поведении кристаллохимически тесно связанных с радиоэлементами редких земель, иттрия, ниобия и, вероятно, кальция.

В начальный этап интрузивного процесса кристаллизация протекает в условиях высокой щелочности и концентрации фтора, что значительно расширяет поля кристаллизации более кислых кристаллических фаз — щелочного амфибола и биотита вместо авгита, что наряду с появлением редкоземельных кальциевых и титанониобиевых акцессорных минералов приводит к уходу значительной части урана и тория с продуктами ранней кристаллизации и обеднению ими остаточного подкисленного расплава. Таким образом, в ходе эволюции Тежсарского вулcano-плутонического комплекса максимальная концентрация урана и тория наступает к концу вулканического и к началу интрузивного этапа, что приводит к почти двукратному обогащению щелочных и нефелиновых сиенитов по сравнению с графосиенитами как ураном, так и торием.

В поздние стадии, в связи с проявлением аутометасоматических процессов, происходит перераспределение и миграция урана и тория с обогащением мусковитизированных, альбитизированных разностей нефелиновых сиенитов, а также пород, богатых содалитом, канкринитом, анальцимом и новообразованных акцессорных минералов: лопарита, ильменорутила, бритолита и др.

В поздние стадии наложения гидротермальных изменений вновь наблюдается увеличение концентрации урана и тория ($\text{Th/U}=5$).

Основные выводы

1. Нефелиновые и щелочные сиениты Тежсарского щелочного комплекса по сравнению с кларком в кислых породах более чем в 1,5—2 раза обогащены ураном ($3,75 \cdot 10^{-4} \%$), торием ($2,75 \cdot 10^{-3} \%$) и в 10 раз радием ($1,2 \cdot 10^{-9} \%$). Ассоциированные с щелочными породами граниты вдвое обеднены радиоэлементами.

2. По сравнению с другими регионами развития щелочных комплексов средние содержания урана и тория в Тежсаре близки к миаскитовым комплексам, но постоянно превышают по содержанию тория ($\text{Th/U}=7,5$).

3. Обогащенность Тежсарского щелочного вулcano-плутонического комплекса радиоэлементами, вариации в темпах возрастания от начальных и промежуточных членов к конечным в вулканический этап и обратная направленность в интрузивный этап свидетельствуют о процессах взаимодействия богатой калием базальтовой магмы с гранитно-метаморфическим субстратом.

4. В ходе эволюции щелочно-базальтоидной магмы накопление радиоэлементов происходит к концу вулканического и к началу интрузивного этапа.

зивного этапа. Максимальной концентрации радиоэлементы достигают при составе лейцитового фанолита—наиболее богатого калием.

5. В распределении радиоэлементов по минералам щелочных пород и гранитоидов наблюдается тенденция преимущественно накопления урана (50—75%) в нефелине и ортоклазе, в меньшей степени в акцессориях, а тория—в кальциево-редкоземельных акцессориях и темноцветных минералах (60—85%), и лишь частично в полевых шпатах.

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамович И. И., Смыслов А. А. Радиогеохимическая изученность горных пород территории Советского Союза. Сб.: «Материалы о содержании и распределении радиоэлементов в горных породах». Тр. ВСЕГЕИ, т. 142, 1968.
- Багдасарян Г. П. Интрузивы Памбако-Базумской области. «Геология Арм. ССР», т. IV. Изд. АН Арм. ССР, 1966.
- Багдасарян Г. П. Щелочные породы центральной части Армянской ССР. Сб. «Вопросы вулканизма». Изд. АН СССР, 1962.
- Билибин Т. В., Титов В. К. Уран и торий в щелочных породах юга Сибирской платформы. Сб.: «Материалы о содержании и распределении радиоэлементов в горных породах». Тр. ВСЕГЕИ, т. 142, 1968.
- Власов К. А., Еськова Е. М., Кузьменко М. Е. Ловозерский щелочной массив. Изд. АН СССР, 1958.
- Геворкян Р. Г. Новые данные о щелочных интрузиях Центральной Армении. ДАН Арм. ССР, № 2, 1964.
- Герасимовский В. И. Геохимия редких элементов Ловозерского щелочного массива. Сб. докл. сов. геологов на XXI международном геол. конгрессе. Изд. АН СССР, 1960.
- Еськова Е. М., Минеев Д. А., Минеева Н. Г. Уран и торий в щелочных породах Урала. Геохимия, № 2, 1962.
- Комлев Л. В. Некоторые вопросы геохимии урана и тория в гранитных магмах. Сб., посвященный В. И. Вернадскому, 1935.
- Котляр В. Н. Памбак. Изд. АН Арм. ССР, 1958.
- Леонов Л. Л., Гаврилин Р. Д. и др. Поведение урана и тория в интрузивном комплексе повышенной щелочности (Сев. Тянь-Шань). Геохимия, № 12, 1961.
- Меликсетян Б. М. К геохимии урана и тория в некоторых гранитоидах юга Армянской ССР. Изв. АН Арм. ССР, сер. геол.-геогрф., № 5, 1961.
- Меликсетян Б. М., Геворкян Р. Г. К вопросу о возрастных взаимоотношениях щелочных и гранитоидных интрузий Памбака. ДАН Арм. ССР, № 3, 1963.
- Нейрберт Д. Уран в изверженных породах США. Материалы междунар. конференции. Женева. Изд. ООН, 1955.
- Саврыкина В. О. О распределении урана в щелочных породах Ловозерского щелочного массива. Геохимия, № 5, 1959.
- Смыслов А. А. Радиоактивные элементы в изверженных горных породах Северного Казахстана. Геохимия, № 8, 1958.
- Таусон Л. В. Геохимия редких элементов в гранитоидах. Изд. АН СССР, 1962.