

С. М. КРАВЧЕНКО, Е. И. ЗАЙЦЕВ, Е. В. ШАТАГИНА

**УРАН — ИНДИКАТОР МАГМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ФОРМИРОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ИНТРУЗИЙ
(НА ПРИМЕРЕ ЛОВОЗЕРА)**

(Представлено академиком Д. С. Коржинским 16 X 1972)

Уран интенсивно обогащает поздние по времени кристаллизации фракции (¹³, ¹²). Постановка и решение задач, связанных с индикаторными особенностями акцессорного U по отношению к процессам кристаллизации нефелин-сиенитовой магмы, стали возможными после фундаментальных геохимических исследований Ловозерского массива (⁴). Использование метода *f*-радиографии, разработанного во Всесоюзном институте ядерной геофизики и геохимии, с облучением образцов в атомном реакторе тепловыми нейтронами, позволяет исследовать распределение малых концентраций U без нарушения структуры пород и минералов и различить первичные магматические и наложенные концентрации (¹, ¹¹).

Пластообразная интрузия Ловозерского массива, диаметром около 25 км (²), сложена 2-километровой толщиной закономерно чередующихся различных нефелиновых сиенитов (дифференцированный комплекс 77%) и более поздним грибообразным телом эвдиалитовых луювритов (18%).

Следуя гипотезе ритмичной кристаллизации, впервые применительно к Ловозеру предложенной в 1956 г. К. А. Власовым *, мы предположили, что после заполнения магматической камеры относительно однородной нефелин-сиенитовой магмой она кристаллизовалась снизу вверх, многократно формируя ритмы, состоящие из анхимономинеральных уртитов, нефелин-калиевополевошпатовых фоййитов и нефелин-калиевополевошпатово-эгириновых луювритов. По мере поднятия фронта кристаллизации уменьшавшийся по объему расплав постепенно обогащался рядом редких элементов и калием. При формировании дифференцированного комплекса выделяются процессы кристаллизационной дифференциации различных порядков: 1-го порядка, приводившие к формированию ритмов; 2-го порядка, вызвавшие разную дифференцированность различных частей интрузий; 3-го, наиболее высокого, порядка, приведшие к отчетливо выраженным различиям в составе нижних и верхних частей дифференцированного комплекса в целом. Формирование ритмов связано с дифференциацией вещества в пределах диффузионного слоя, возникающего перед фронтом кристаллизации (⁴, ¹⁰). Процессы фракционирования более высокого порядка представляют собой интегральный результат направленных изменений процессов фракционирования 1-го порядка.

Следует отметить «микрофракционирование» U в структурной ткани пород. Наиболее четко оно выражено в ходе кристаллизации фоййитов, характеризующейся растянутым температурным интервалом (⁶). Подавляющая часть U «сбрасывалась» в поздние, в том числе эпимагматические фракции (⁷). В фоййите кристаллы лопарита обогащены по периферии U (рис. 1 б, в). От них обычно отходят натролитовые прожилки, обогащенные U, что говорит об эпимагматическом обогащении им периферических зон кристаллов лопарита.

* По важнейшим вопросам генезиса Ловозерского массива, отдельных его частей, пород и минералов единой точки зрения не существует. Поэтому приводимые ниже данные другими исследователями, вероятно, могут быть интерпретированы иначе.

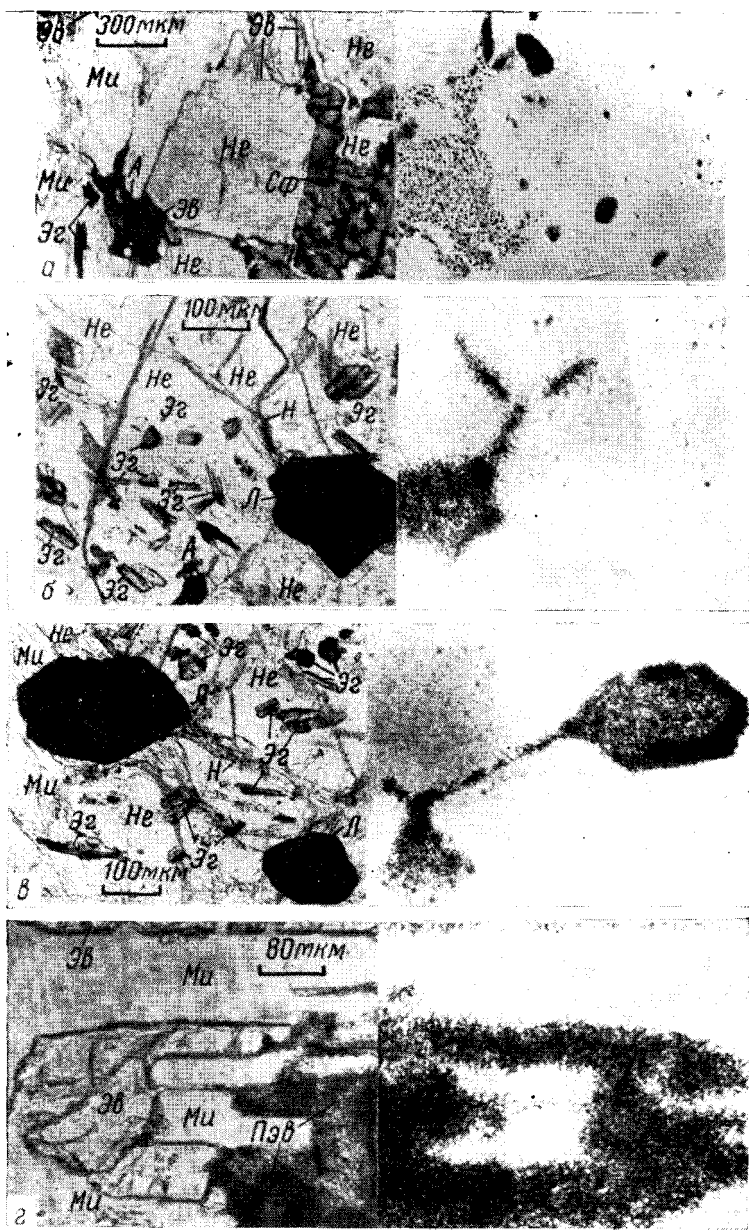


Рис. 1. Микрофотографии шлифов нефелиновых сланцев Ловозера (инк. β) и соответствующих им лавсановых детекторов после облучения тепловыми нейтронами в реакторе (соотношение зеркальное). Интегральный нейтронный поток для $a - 5 \cdot 10^{14}$ н/см², для $б-г - 1 \cdot 10^{16}$ н/см². a - амфиболовый лувврит со сфеном и эвдиалитом; $б-в$ - лопарит фойяитов с зональным распределением концентраций урана и отходящими от него натролитовыми прожилками, обогащенными ураном, соотношение зеркальное; $г$ - эвдиалит и продукты его изменения в фойяите. $Н$ - натролит, He - нефелин, $Mи$ - микроклин, $Эг$ - эгирин, $Сф$ - сфен, $Эв$ - эвдиалит, $ПЭв$ - продукты изменения эвдиалита, $А$ - арфведсонит, $Л$ - лопарит

При фракционировании урана 1-го порядка его валовые концентрации в породах изменялись немонокотонно, о чем свидетельствуют средние концентрации в урритах, фойяитах и луавритах, по данным ⁽⁴⁾, 9, 21 и 43 г/т. При последовательной кристаллизации дифференцированного комплекса снизу вверх волнообразное изменение концентраций в пределах ритмов происходило при некотором общем повышении концентраций урана по разрезу трех ритмов (см. рис. 2), условно обозначаемых ⁽⁴⁾:

| | |
|---------------------|--|
| Ритмы (снизу вверх) | III-4 |
| Содержание (г/т) | 7,73; 7,12; 11,29; 8,97; 9,46; 8,57; 12,41; 5,11 |
| Ритмы (снизу вверх) | III-3 |
| Содержание (г/т) | 6,83; 3,39; 11,20; 6,08; 6,49; 4,13 |
| Ритмы (снизу вверх) | I-4 |
| Содержание (г/т) | 12,08; 11,17; 13,47; 6,28; 8,83; 6,077,32; |

Полученные *f*-радиограммы показывают, что наличие привнесенного, наложенного U для пород дифференцированного комплекса нехарактерно

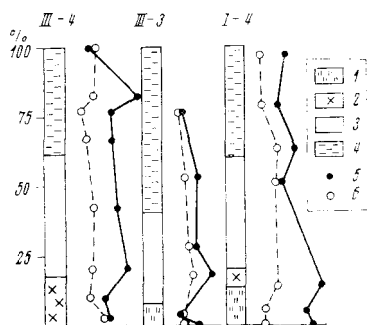


Рис. 2

Рис. 2. Изменение концентраций урана и калия (определен методом фотометрии пламени; аналитики Т. А. Абрамова, С. А. Rogozина, Л. Ф. Карташова) по разрезу ритмов III-4, III-3 и I-4. 1 - уррит, 2 - ювит, 3 - фойяит, 4 - луаврит, 5 - уран, 6 - калий

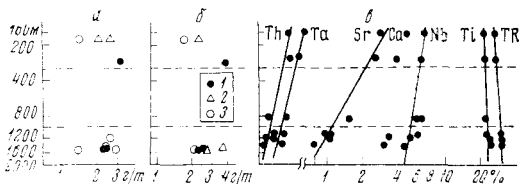


Рис. 3

Рис. 3. Распределение концентраций компонентов в минералах по разрезу дифференцированного комплекса. а - U в нефелине; б - U в альбите; в - TR, Ti, Nb, Ca, Sr, Ta, Th в лопарите. Породы, содержащие минерал: 1 - уррит, 2 - фойяит, 3 - луаврит

(рис. 1а). Во всех ритмах отмечается в общем одинаковый ход кривых концентрации U: резкое уменьшение концентраций в урритах (ювитах III-4) - начальных членах ритмов, затем более резкое увеличение в фойяитах (ювитах I-4) и постепенное снижение в луавритах. Концентрационные кривые U и K обнаруживают почти полную конформность. Аналогичное их поведение установлено при дифференциации базальтовых магм ⁽⁵⁾.

Распределение концентраций U в минералах в пределах ритма в общем аналогично распределению валовых концентраций по породам (см. ниже цифровые данные, рис. 1г и ⁽⁴⁾).

Результаты фракционирования урана 2-го и 3-го порядков зафиксированы в вертикальном разрезе обогащением нефелиновых спенитов верхних горизонтов дифференцированного (и эвдиалитового) комплекса по сравнению с одноименными породами, расположенными гипсометрически ниже ^(4, 7).

Нами изучено содержание равномерно распределенного U в породообразующих минералах * (рис. 3а, б):

| | | | | | | | |
|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------|-------------------|
| Расстояние (м) | +193; | +56; | -74; | -95; | -175; | -177; | -180 |
| Содерж. в нефелине (г/т) | 2,54 ^Л ; | 1,72 ^Л ; | 2,48 ^Л ; | 2,28 ^Ф ; | 2,87 ^У ; | 3,23; | 1,87 ^Л |

* Индексами Л, Ф и У помечены содержания в минералах луавритов, фойяитов и урритов соответственно; положение образцов в разрезе указано по расстоянию от подошвы эвдиалитового комплекса и кровли дифференцированного.

| | |
|--------------------------|---|
| Расстояние (м) | -1210; -1430; -1495; -1497; -1510; -1520 |
| Содерж. в нефелине (г/т) | 3,20 ^{II} ; 2,95 ^Ф ; 2,80 ^У ; 2,64 ^{II} ; 1,81 ^{II} ; 2,07 ^У |
| Расстояние (м) | +56; -84; -95; -155; -270; -1430; -1495 |
| Содерж. в альбите (г/т) | 1,36 ^{II} 1,54 ^{II} ; 2,92 ^Ф ; 2,64 ^Ф ; 4,84 ^У ; 4,45 ^Ф ; 3,03 ^У |
| Расстояние (м) | -1497; -1500; -1530 |
| Содерж. в альбите (г/т) | 2,54 ^{II} ; 3,38 ^{II} ; 2,63 ^У |

В пределах контуров кристаллов К-полевого шпата при облучении интегральным потоком нейтронов до $7,2 \cdot 10^{16}$ н/см² выявляется только равномерно распределенный U, связанный с пертитовым альбитом. Концентрации же U в собственно К-полевым шпате на два порядка ниже, чем в альбите. Изменение концентраций равномерно распределенного U в нефелине и альбите в одноименных породах дифференцированного комплекса, если и направлено, то только в пределах отдельных частей дифференцированного комплекса.

Значительный интерес представляет закономерный характер изменения концентраций Th, Ta, Sr, Nb, Ti и TR в акцессорном лопарите в зависимости от положения нефелиновых сиенитов в разрезе дифференцированного комплекса (^{3, 4, 9}). * Как видно на рис. 3в, логарифмы концентраций TR, Ti, Nb, Th, Ta и Sm в лопарите уртитов (⁴) прямо пропорциональны логарифму индекса дифференциации, определяющему положение образца в разрезе, т. е. их распределение зависело от процессов фракционирования 3-го порядка. Из теории фракционирования известно, что указанная пропорциональность соблюдается в ходе фракционной кристаллизации при постоянных коэффициентах распределения для соответствующих компонентов (^{8, 5}). Такой режим кристаллизации приводит к пропорциональности логарифмов концентрации соответствующих пар компонентов в последовательных дифференциатах (⁵), что и наблюдается на логарифмических графиках (рис. 4). Аппроксимирующие прямые рис. 4 описываются линейными логарифмическими уравнениями,

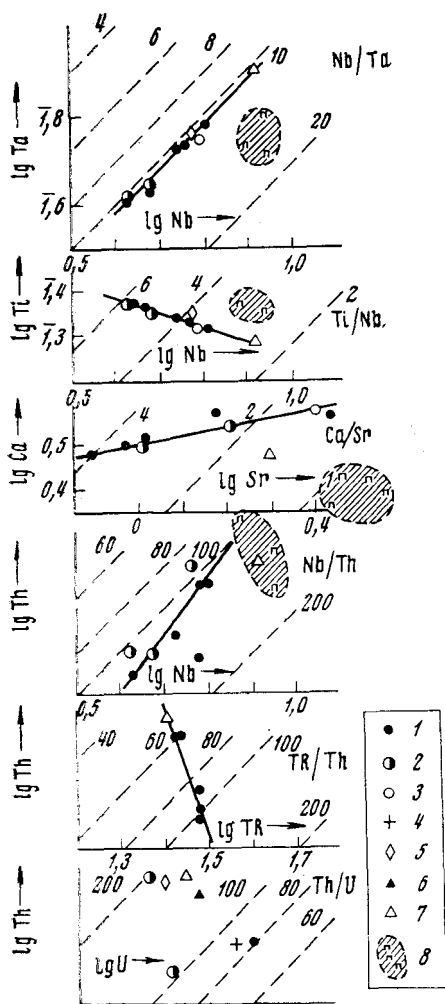


Рис. 4. Соотношение логарифмов концентраций Ta - Nb, Ti - Nb, Ca - Sr, Th - Nb, Th - TR, Th - U в лопаритах нефелиновых сиенитов (⁴) и пегматитов (³). 1 - уртиты, 2 - луявриты, 3 - малиниты, 4 - фойниты, 5 - порфирированные ювиты, 6 - пойкилитовые нефелиновые сиениты, 7 - эвдиалитовые луявриты, 8 - пегматиты нефелиновых сиенитов. Прерывистые линии - линии равных отношений

* Показано, что из этой зависимости должны быть исключены лопариты амфиболовых луявритов с резко пониженной величиной Fe^{3+}/Fe^{2+} (⁷).

потенцирование которых приводит к степенным функциям: $Ca=3,16Sr^{0,194}$, $Th=0,421 Nb^{1,28}$, $Th=7,070 TR^{-2,99}$; $Ta=0,093 Nb$; $Ti=38,21 Nb^{-0,331}$ *.

U по сравнению с другими элементами лопарита распределен в наибольшей мере беспорядочно (рис. 4e), что можно объяснить наличием наложенного U в лопарите (рис. 16, e).

Соотношения концентраций компонентов в лопаритах (4) согласуются с теорией фракционной кристаллизации, что подтверждает гипотезу ритмичной фракционной кристаллизации (4, 10), магматический генезис проанализированных лопаритов и является следствием скрытой расслоенности, присутствующей дифференцированным интрузиям.

Авторы благодарны И. Г. Берзиной за содействие в постановке метода f-радиографии, В. Н. Терешкову и А. Н. Мерькову — за помощь в сборе фактического материала.

Институт минералогии, геохимии
и кристаллохимии редких элементов
Москва

Поступило
13 X 1972

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. Г. Берзина, И. Б. Берман и др., Атомная энергия, т. 23, № 6 (1967). ² И. В. Буссен, А. С. Сахаров, Петрология Ловозерского массива, «Наука», 1972. ³ В. С. Быкова, ДАН, т. 33, № 2 (1941). ⁴ В. И. Герасимовский, В. П. Волков и др., Геохимия Ловозерского щелочного массива, «Наука», 1966. ⁵ С. М. Кравченко, В кн. Редкометалльные месторождения, их генезис и методы исследования, «Наука», 1972. ⁶ Л. Н. Когарко, Д. Гамильтон, Д. Нолан, Фазовые равновесия в ходе плавления агпаитовых щелочных пород. Международн. геохимич. конгресс. Тез. докл., 1971. ⁷ А. И. Поляков, Геохимия тория в щелочных породах Кольского полуострова, «Наука», 1970. ⁸ И. Д. Рябчиков, Термодинамический анализ поведения малых элементов при кристаллизации силикатных расплавов, «Наука», 1965. ⁹ Е. И. Семенов, Минералогия Ловозерского щелочного массива, «Наука», 1972. ¹⁰ А. А. Ярошевский, Геохимия, № 5 (1970). ¹¹ R. L. Fleischer, C. W. Naeser et al., Science, v. 148, 988 (1965). ¹² P. Henderson, A. Machinon, N. H. Gale, Geochim. et cosmochim. acta, v. 35, № 9, 917 (1971). ¹³ H. Higuchi, H. Nagasawa, Earth and Planet. Sci. Lett., v. 7, 281 (1969).

* С известным приближением (истинная мощность дифференцированного комплекса принята равной 2 км; точность линейной аппроксимации и аналитических данных по (4)) изменение логарифмов концентраций (вес.%) компонентов лопаритов уртитов в зависимости от положения в разрезе выражается следующими уравнениями: $\lg Th=1,653-0,213 \lg 0,5 M^L$; $\lg Ta=1,778-0,250 \lg 0,5 M^L$; $\lg Sr=0,441-0,493 \lg 0,5 M^L$; $\lg Nb=0,810-0,150 \lg 0,5 M^L$; $\lg Ti=1,320-0,044 \lg 0,5 M^L$; $\lg TR=1,430+0,070 \lg 0,5 M^L$, где M^L — расстояние (км) от любого образца до обр. № 3137 (4), расположенного на 160 м ниже контакта дифференцированного и эвдиалитового комплексов (7).