

УДК 546.65+550.93+552.321(470.22)

ВЫЯВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ МАГМ ГРАНИТОИДНЫХ КОМПЛЕКСОВ СВЕКОФЕННСКОГО ТЕКТОНО-МЕТАМОРФИЧЕСКОГО ЦИКЛА ПО ДАННЫМ ГЕОХИМИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (СЕВЕРНОЕ ПРИЛАДОЖЬЕ)

© 2003 г. Член-корреспондент РАН В. А. Глебовицкий,
И. С. Седова, Л. М. Саморукова

Поступило 09.10.2002 г.

Куркиекский плутон эндербитов (γK), Лаувтсаарский плутон кварцевых диоритов – тоналитов (γL) и Тервуский плутон двуполевошпатовых гранитов (γT) являются эталонами интрузивных комплексов, формирование которых связано соответственно с началом, серединой и концом раннепротерозойского тектоно-метаморфического цикла в Северном Приладожье [1, 2]. Их возраст по магматическим цирконам определен в 1881.4 ± 6.7 , 1878.5 ± 3.3 , 1858.8 ± 2.5 млн. лет [3]. Условия метаморфизма в момент их становления эволюционировали в последовательности $750\text{--}800^\circ\text{C}$, $5\text{--}6$ кбар $\rightarrow 680\text{--}720^\circ\text{C}$, $5.5\text{--}4$ кбар $\rightarrow 600\text{--}450^\circ\text{C}$, $3.5\text{--}2.5$ кбар [4]. На основании связи с разновозрастными деформациями и метаморфическими событиями, присутствия разделяющих их даек основного и среднего составов, особенностей петрохимии пород и флюидного режима магматизма предполагалось, что формирование плутонов происходило из разных источников [4]. Данные геохимического изучения, прежде всего относящиеся к редким землям и примыкающим к ним по свойствам элементам, подтверждают это предположение, чему и посвящена настоящая работа.

Наиболее ранний из рассматриваемых Куркиекский плутон состоит из главной фазы γK^1 и нескольких более мелких тел передовой фазы γK^2 . Он располагается в породах ладожской серии, метаморфизованных в условиях гранулитовой фации, и прорывает ранние мигматиты, тогда как более поздние лейкосомы, формирующиеся в амфиболитовой фации, секут плутон [1]. Плутон сложен варьирующими по составу эндербитами (диоритами, тоналитами) с колебаниями SiO_2 от 52 до 68%. Преобладающая ассоциация – $\text{Pl} + \text{Qtz} \pm \text{Kfs} + \text{Vt} + \text{Hbl} + \text{Orx} \pm \text{Srx}$. Породы главной фазы

отличаются от передовой более высокими содержаниями Al и K, низкими Mg, Fe и Ca [4]. Лаувтсаарский плутон внедрялся в условиях амфиболитовой фации после формирования мигматитов с лейкосомами трех ранних генераций, по-видимому, одновременно с явлениями диатексиса, результатом которого являются авто- и параавтохтонные тела гранодиоритов, монцодиоритов и тоналитов района Путсаари (γP), и пересекается лейкосомами мигматитов поздних генераций (четвертой и пятой) [4, 5]. Породы Лаувтсаари варьируют по составу от кварцевых диоритов до тоналитов (SiO_2 57–69%). Распространенная ассоциация – $\text{Pl} + \text{Qtz} \pm \text{Kfs} + \text{Vt} + \text{Hbl} \pm \text{Srx}$. Тервуский плутон двуполевошпатовых гранитов внедрялся после формирования мигматитов в относительно жесткую раму и претерпел изменения по зонам в условиях низкотемпературной амфиболитовой–зеленосланцевой фаций [1, 6]. По составу породы относятся к гранитам. Интервал вариаций SiO_2 67–75%. Ассоциация – $\text{Kfs} + \text{Pl} + \text{Qtz} + \text{Vt} \pm \text{Ms}$.

Для всех плутонов характерны значимые линейные корреляционные отрицательные связи Si с главными элементами, исключая щелочи, причем линии регрессии Si–Al, Ca, Mg, Fe для плутонов индивидуальны. Калий положительно связан с Si только в γT . Различия в составе плутонов отчетливо фиксируются и на диаграмме $(\text{K} + \text{Na})/\text{Ca} - \text{A}_c$ [7]. Особенно выделяются породы γT , причем только их составы ложатся на линию известково-щелочных пород, тогда как другие пересекают линии известных трендов (рис. 1). Значения ASI возрастают к γT , типичным S-гранитам. Величина H/C (в скобках) увеличивается в ряду $\gamma\text{K}^2(2.34) \rightarrow \gamma\text{K}^1(2.5) \rightarrow \gamma\text{L}(3.64) \rightarrow \gamma\text{T}(3.48)$, что отражает более высокое содержание во флюиде эндербитов CO_2 относительно H_2O по сравнению с тоналитами Лаувтсаари и гранитами Терву [4].

*Институт геологии и геохронологии докембрия
Российской Академии наук, Санкт-Петербург*

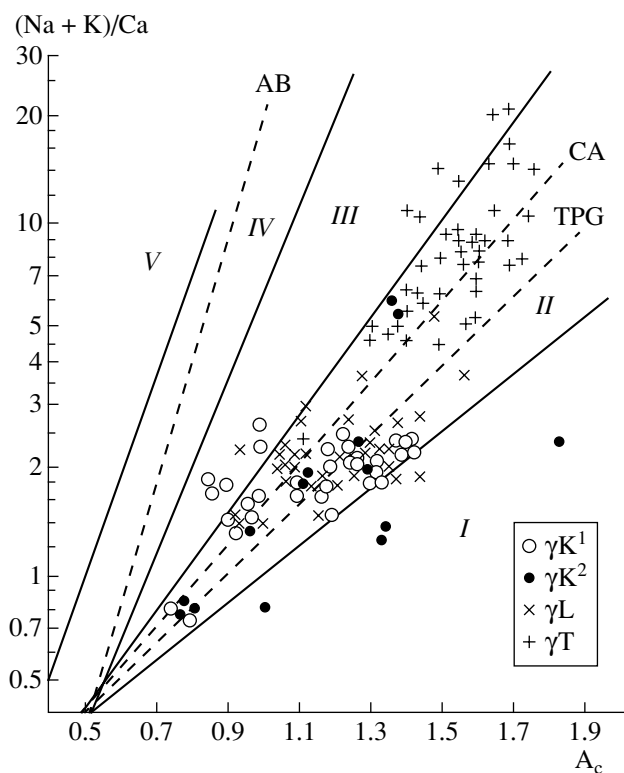


Рис. 1. Диаграмма $(Na + K)/Ca - A_c$ [8] для пород плутонов. Поля щелочности и группы серий (в скобках): *I* – известковое (низкокальциевая толеитовая), *II* – известково-щелочное (среднекальциевая и повышенно-кальциевая), *III* – субщелочное (высококальциевое), *IV* – щелочное, базальтовое, *V* – щелочное (нефелинит-фонолитовая). Тренды: CA – известково-щелочной, AB – щелочно-базальтовый, TPG – архейский тоналит-плагиогранитный (трондьемитовый).

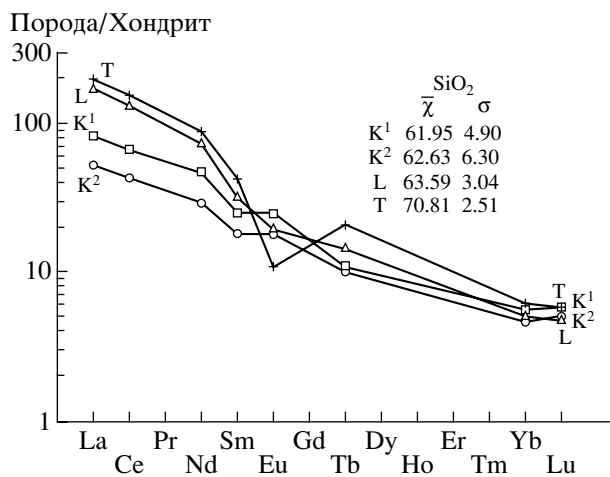


Рис. 2. Нормированное на хондрит [11] распределение REE в породах плутонов Куркиевского (фазы: передовая K² и главная K¹), Лауватсаарского (L) и Тервуского (T) для средних содержаний.

Изучение REE в 28 образцах плутонов, преимущественно методом нейтронной активации, показало, что их содержание возрастает в ряду $\gamma K^2 \rightarrow \gamma K^1 \rightarrow \gamma L \rightarrow \gamma T$, особенно значительно для LREE (рис. 2, 3), что отражается в увеличении La/Yb-отношения. Это свидетельствует об усилении фракционирования в поздних плутонах. Отрицательная Eu-аномалия, отчетливая в γT , практически отсутствует в γK и слабо проявлена в γL . Это связано с присутствием более кислых плагиоклазов в γT , которые содержат меньше Eu, чем более основные плагиоклазы γK . Содержание Eu в плагиоклазах уменьшается в рассматриваемой последовательности плутонов

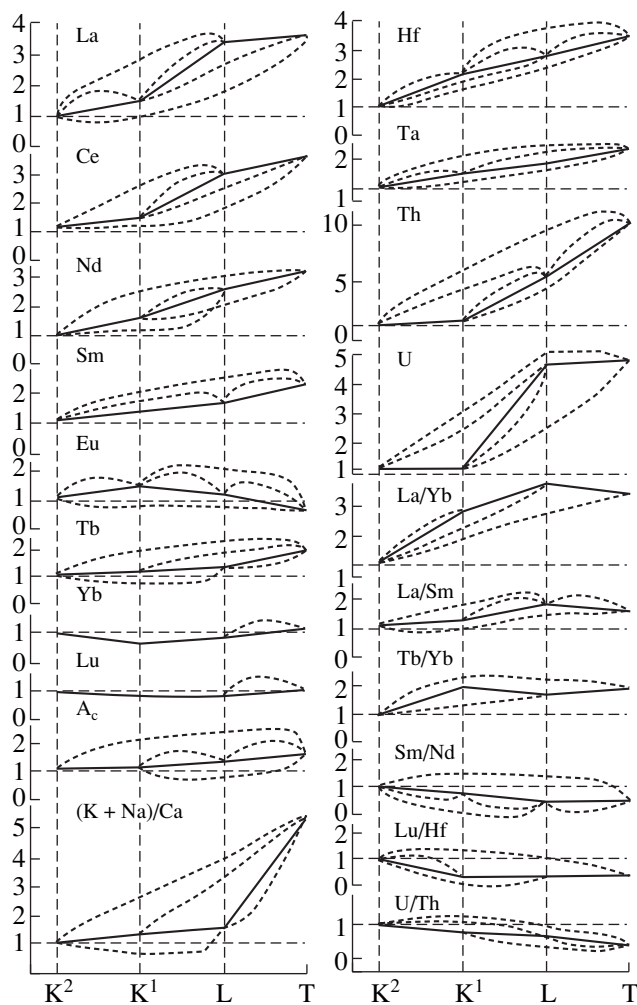


Рис. 3. Средние содержания REE, Hf, Ta, Th, U, параметров состава пород и некоторых отношений для передовой и главной фаз Куркиевского плутонов (K² и K¹), Лауватсаарского (L) и Тервуского (T) плутонов, нормированные на соответствующие значения для передовой фазы Куркиевского плутона. Точками соединены величины, значимо отличающиеся (95% вероятность). Значимость различий оценена по порядковому критерию X [12].

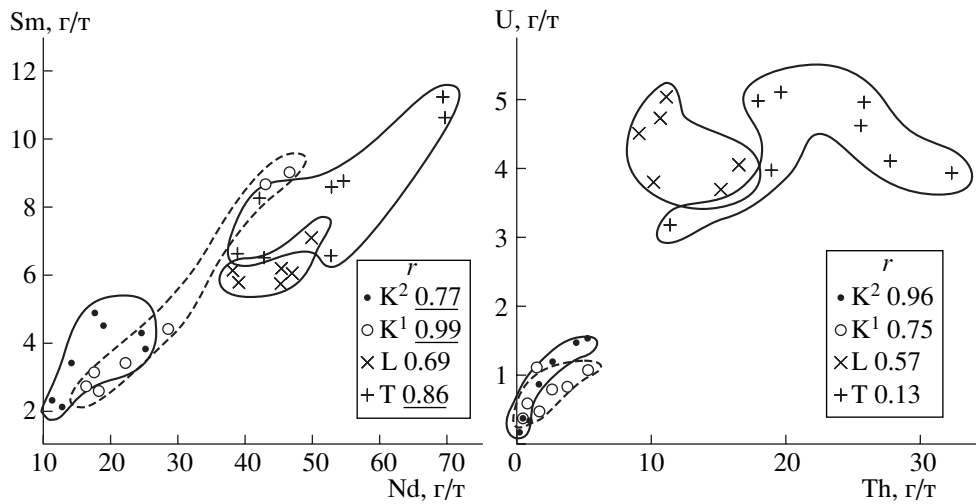


Рис. 4. Диаграммы Sm–Nd и U–Th для пород плутонов. Приведены значения коэффициентов линейной корреляции, подчеркнуты их значимые величины (95% вероятность).

1.48–2.44 → 1.99–2.25 → 1.32–1.76 → 0.72–0.84 [8]. Эти данные свидетельствуют о заметной роли фракционирования более основного плагиоклаза на глубинах в процессе становления Тервуского плутона. Характерно, что по содержанию как главных, так и малых элементов эндрбиты двух фаз мало отличаются друг от друга (см. рис. 3), тогда как обе фазы практически по всем исследуемым элементам отличны от γL и γT . Следует отметить, что по главным элементам γL ближе к γK^2 и γK^1 , чем к γT , тогда как по малым элементам, в том числе LREE, они ближе к γT . Обращает внимание также специфика линейных корреляционных связей в плутонах. Так, например, Si в γT положительно связан с La, Ce, Nd, Sm, Tb, в γK^1 таких связей не наблюдается, но установлены значимые связи между Si и Tb, Yb, Lu. В группе редких земель, даже если фиксируются значимые связи между элементами в рассматриваемых плутонах, их линии трендов индивидуальны (рис. 4). При отсутствии линейных связей точки составов разновременных плутонов группируются в самостоятельные поля (рис. 4).

Обратимся к закономерностям изменений некоторых отношений малых элементов. От γK^2 к γT отношение Sm/Nd уменьшается (см. рис. 3). Известно, что коровые породы имеют меньшие значения этого отношения, чем породы, ведущие свое происхождение из верхней мантии [9]. Кроме того, жидкая фаза обогащается Nd относительно Sm. Поэтому расплавы, образующиеся при частичном плавлении пород субстрата, обогащаются Nd относительно Sm. С этих позиций Тервуский плутон можно рассматривать как более “коровый”, чем Куркиекский. Последний ближе к мантийным образованиям, хотя значения Sm/Nd более низкие, чем принято для соответ-

ствующих по составу мантийных пород [9]. Это связано с ассимиляцией корового вещества магмой при внедрении в нижнюю кору, что подтверждается данными Sm–Nd-изотопии.

Известно, что значения Sm/Nd-отношений уменьшаются вдоль Боуэновского тренда кристаллизации. Ниже приведены значения этого отношения (в скобках) в минералах плутонов для 8 образцов, определенные методом ICP MS:

- γK^2 обр. 143/1 Оpx(0.382) → Bt(0.241) → Pl(0.144),
обр. 148 Bt(0.465) → Оpx(0.257) →
→ Ilm(0.244) → Pl(0.192);
- γK^1 обр. 6 Оpx(0.472) → Сpx(0.373) →
→ Ap(0.278) → Pl(0.126) → Bt(0.094),
обр. 103 Bt(0.223) → Оpx(0.166) → Pl(0.135);
- γL обр. 23/1 Hbl(0.312) → Bt(0.199) → Pl(0.114),
обр. 68/4 Hbl(0.644) → Bt(0.393) → Pl(0.224);
- γT обр. 22/2 Ap(0.354) → Ms(0.206) →
→ Kfs(0.162) → Pl(0.151) → Bt(0.081),
обр. 22/4 Bt(0.302) → Ms(0.23) →
→ Kfs(0.153) → Pl(0.146).

Последовательности соответствуют ожидаемым, но позиция биотита неустойчива, что, возможно, связано с постоянным присутствием в нем включений акцессорных минералов (апатита, циркона), распределенных неравномерно. По некоторым данным, биотиты очень бедны редкими землями [10]. Значения Sm/Nd-отношений в породах выше, чем в плагиоклазах, но ниже пироксенов и в ряде случаев биотитов. Sm/Nd-отношения уменьшаются в биотитах и плагиоклазах и одновременно в содержащих их породах от эндрбитов пере-

довой фазы к главной. Далее такая закономерность не выдерживается. Характерно, что ортопироксены γK^2 имеют тенденцию к обогащению Cr, Ni и обеднению Sc, Zr, Y относительно ортопироксенов γK^1 , что свидетельствует о более высокой температуре кристаллизации первых [8]. Отношения Lu/Hf и U/Th близки по характеру поведения к Sm/Nd, что и следовало ожидать исходя из геохимического сходства этих элементов (см. рис. 4). Отличия состоят в том, что Sm с Nd имеют положительные значимые связи в каждом плутоне (см. рис. 4), тогда как U и Th связаны положительно только в эндербитах, причем отсутствуют различия между средними содержаниями этих элементов в обеих фазах. Не установлены линейные связи для этой пары элементов в γL и γT при значимо более высоком содержании Th в последних. Отсутствуют связи между Lu и Hf в плутонах, но эндербиты обеих фаз, гранитоиды Лауватсаари и Терву образуют самостоятельные поля. Все указанные выше закономерности свидетельствуют о разных магматических источниках для трех плутонов и образовании эндербитов передовой и главной фаз Куркиекского плутона из одного источника, причем “коровость” плутонов возрастает к молодым тервуским двуполевошпатовым гранитам.

Работа выполнена благодаря поддержке РФФИ (проекты 00–15–98475 и 00–05–65268).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мигматизация и гранитообразование в различных термодинамических режимах / Под ред. Ф.П. Митрофанова. Л.: Наука, 1985. 310 с.
2. Котов А.Б., Саморукова Л.М. Эволюция гранитообразования в тектоно-метаморфических циклах раннего докембрия. Л.: Наука, 1990. 159 с.
3. Глебовицкий В.А., Балтыбаев Ш.К., Левченков О.А. и др. // ДАН. 2001. Т. 377. № 5. С. 667–671.
4. Sedova I.S., Krylov D.P., Hoernes S., Samorukova L.M. Capricious Earth: Models and Modelling of Geologic Processes and Objects. St. Petersburg; Athens: Theophrastus Publ., 2000. P. 1–21.
5. Глебовицкий В.А., Седова И.С. // Зап. ВМО. 1998. № 4. С. 5–26.
6. Глебовицкий В.А., Саморукова Л.М., Седова И.С. // Зап. ВМО. 1997. № 3. С. 1–19.
7. Бородин Л.С. Петрохимия магматических серий. Л.: Наука, 1987. 261 с.
8. Седова И.С., Саморукова Л.М. // Зап. ВМО. 2002. № 6. С. 1–22.
9. Фор Т. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
10. Bea F. // J. Petrol. 1997. V. 37. № 5. P. 521–552.
11. Boynton W.V. In: Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam, 1984. P. 63–114.
12. Ван дер Варден. Математическая статистика. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 434 с.