

## Петрохимическая характеристика пород Контозерского вулканогенно-осадочного комплекса

Забавчик Н.И. , Пахомовский Я.А., Михайлова Ю.А. 

Геологический институт ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, n.zabavchik@ksc.ru

**Аннотация.** Контозерский вулканогенно-осадочный комплекс располагается на северо-востоке Кольского полуострова и является частью Кольской щелочной провинции. В его геологическом строении выделяется три основные толщи (Контозерская серия): вулканогенно-терригенная, вулканогенная и карбонатно-терригенная. Также установлены интрузивные образования палеозойского возраста и метасоматиты. В представленной работе рассмотрены петрохимические особенности пород Контозерского вулканогенно-осадочного комплекса. По результатам факторного анализа данных о химическом составе пород, были установлены как положительные, так и отрицательные корреляции элементов и их распределение в различных типах пород Контозерского комплекса.

**Ключевые слова:** карбонатиты, петрохимия, Контозерский комплекс, палеовулкан.

## Petrochemical features of rocks of the Kontozero volcanogenic-sedimentary complex

Zabavchik N.I. , Pakhomovsky Ya.A., Mikhailova J.A. 

The Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, n.zabavchik@ksc.ru

**Abstract.** The Kontozero volcanogenic-sedimentary complex is located in the north-east of the Kola Peninsula. There are three major units in its geological structure (the Kontozero series): volcanogenic-terrigenous, volcanogenic and carbonate-terrigenous. Intrusive formations of Paleozoic age and metasomatites have also been established. In the presented work, the petrochemical features of the rocks of the Kontozero complex are considered. Based on the results of “wet” chemistry and factor analysis, both positive and negative correlations of elements and their distribution in various types of rocks of the Kontozero complex were founded.

**Keywords:** carbonatites, petrochemistry, Kontozero complex, paleovolcano.

### Введение

Контозеро представляет собой зону опускания – кальдеру, ограниченную кольцевыми разломами и окруженную архейскими гнейсами. Эта кольцевая структура представляет собой самостоятельное вулcano-тектоническое образование, которое сложено осадочными и вулканогенными породами палеозойского возраста (Кириченко, 1970).

В геологическом строении Контозерского осадочно–вулканогенного комплекса выделяется три основные толщи: 1) нижняя терригенно-вулканогенная в плане представляет собой дугообразную полосу шириной 0.3–2 км состоит из лав ультраосновного состава, туфов и туфитов с прослоями конгломератов и алевролитов; 2) средняя вулканогенная состоит из щелочных пикритов, меланефелинитов, нефелинитов, фонолитов и тефритов (лавы, лавовые брекчии и туфы); 3) верхняя карбонатно-терригенная (карбонатитовая) включает карбонатитовые лавы и туфы, туффиты и туфовые брекчии. Обрамляют кальдеру несколько интрузий пироксенитов и сиенитов (щелочных и нефелиновых). Прежде чем перейти к рассмотрению петрохимических особенностей пород Контозерского комплекса, представим их краткую петрографическую характеристику.

Лампрофиры – представители нижней терригенно-вулканогенной толщи. Породы состоят из крупных зерен оливина и кальцитовых оцеллей, погруженных в мелкозернистую допсидфлогопитовую массу с россыпью титаномагнетита и ульвошпинели (рис. 1). Типичные представители вулканогенной толщи – фонолиты. Основную массу этих пород составляют нефелин, калиевый полевой шпат, а также темнокрасные минералы – щелочные пироксены и амфиболы (рис. 2). Важно также отметить, что в фонолитах присутствует первичный кальцит.

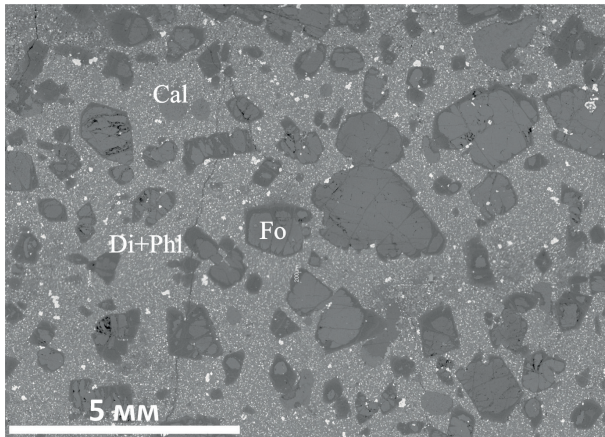


Рис. 1. Участок полированного образца лампрофира из терригенно-вулканогенной толщи Контозерского комплекса (обр. КТ-30/1). BSE-изображение. Di – диопсид, Phl – флогопит, Fo – форстерит, Cal – кальцит.

Fig. 1. A section of a polished lamprophyre sample from the terrigenous-volcanogenic strata of the Kontozero complex (samp. KT-30/1). BSE-image. Di – diopside, Phl – phlogopite, Fo – forsterite, Cal – calcite.

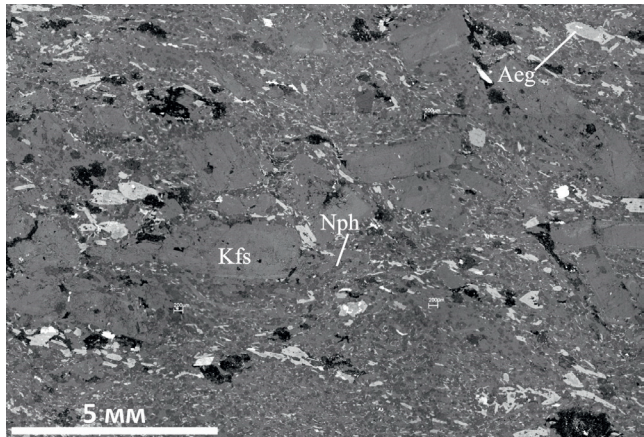


Рис. 2. Участок полированного образца фонолита из вулканогенной толщи Контозерского комплекса (обр. КТ-25/4). BSE-изображение. Kfs – калиевый полевой шпат, Nph – нефелин, Aeg – эгирин.

Fig. 2. A section of a polished phonolite sample from the volcanogenic strata of the Kontozero complex (samp. KT-25/4). BSE-image. Kfs – potassium feldspar, Nph – nepheline, Aeg – aegirine.

Карбонатно-терригенную толщу составляют разнообразные карбонатиты, сложенные кальцитом, доломитом и анкеритом. В качестве второстепенных минералов в породе отмечены фторапатит, стронцианит, магнетит, различные сульфиды (рис. 3). Для карбонатитовой части комплекса характерно наличие брекчий, вулканических туфов и туффигов, обломки представлены как силикатными, так и карбонатными породами. На первый взгляд кажется, что изучение особенностей их химического состава некорректно в силу разнообразия состава обломков, однако установлено, что в породах Контозерской серии снизу вверх происходит уменьшение их содержания (Кириченко, 1970). Поэтому некоторые наиболее однородные образцы также были изучены нами, а петрохимические особенности будут рассмотрены в данной работе. Интрузивные породы рассмотрим на примере нефелинового сиенита, сложенного нефелином, калиевым полевым шпатом и альбитом (рис. 4).

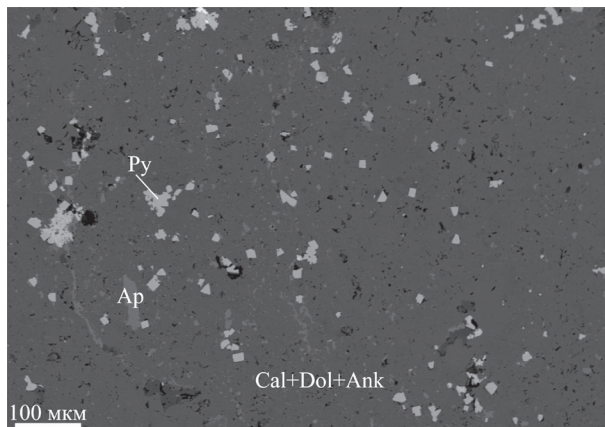


Рис. 3. Из карбонатно-терригенной толщи Контозерского комплекса (обр. 6-578.2). BSE-изображение. Cal – кальцит, Dol – доломит, Ank – анкерит, Py – пирит, Ap – апатит.

Fig. 3. A section of a polished carbonatite sample from the carbonate-terrigenous strata of the Kontozero complex (samp. 6-578.2). BSE-image. Cal – calcite, Dol – dolomite, Ank – ankerite, Py – pyrite, Ap – apatite.

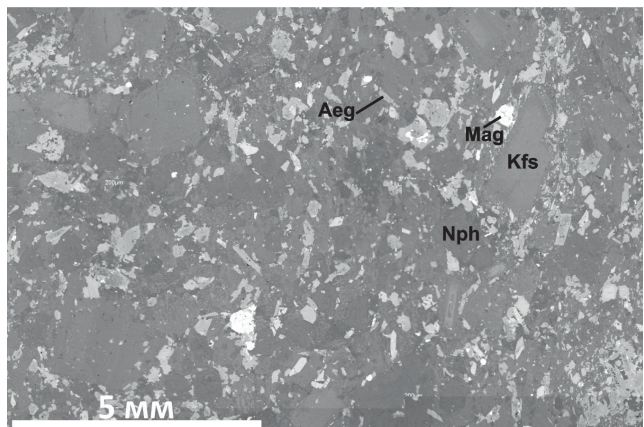


Рис. 4. Участок полированного образца нефелинового сиенита из интрузивной части Контозерского комплекса (обр. КТ-27/5-1). BSE-изображение. Kfs – калиевый полевой шпат, Nph – нефелин, Mag – магнетит, Aeg – эгирин.

Fig. 4. A section of a polished sample of nepheline syenite from the intrusive part of the Kontozero complex (samp. KT-27/5-1). BSE-image. Kfs – potassium feldspar, Nph – nepheline, Mag – magnetite, Aeg – aegirine.

## Материалы и методы

Основой для исследования стал материал автора, отобранный в ходе полевых работ в июле-августе 2022 г. Для изучения химического состава пород Контозерского вулканогенно-осадочного комплекса были использованы классические методы «мокрой» химии. Аналитика проводилась в Геологическом институте КНЦ РАН. Для последующего описания и характеристики полученных химических составов пород был использован программный пакет для статистического анализа – STATISTICA 12.

## Результаты

По результатам химического анализа пород была создана база данных, в которой они отсортированы в соответствии с их местом отбора на геологической карте Контозерского вулканогенно-осадочного комплекса. Таким образом мы получили 5 типов пород: 1) терригенно-вулканогенные (3 обр.); 2) вулканогенные (12 обр.); 3) карбонатно-терригенные (17 обр.); 4) сиениты щелочные и нефелиновые (21 обр.); 5) метасоматиты цеолит-анкеритовые, альбит-цеолит-анкеритовые, доломит-анкеритовые (18 обр.).

Лампрофиры не поддаются классификации в соответствии с модальными пропорциями, такими как система QAPF или диаграммам дискриминации по составу, например TAS, поскольку их минералогия и геохимия специфичны. Они классифицируются в рамках IUGS Номенклатура магматических пород (Le Maitre, 1989; Tappe et.al., 2005) отдельно, в первую очередь потому, что они редки, обладают своеобразной минералогией и не подходят для классических классификационных схем.

Табл.1 Сравнительная таблица репрезентативных химических составов лампрофиров Контозерского вулканогенно-осадочного комплекса и Италии

Table 1 Comparative table of representative chemical compositions of lamprophyres of the Kontozero volcanogenic-sedimentary complex and lamprophyres of Italy

| Компонент<br>мас. %            | КТ-30/1 | Carbonatitic Italian lamprophyres<br>(Vichi et. al, 2005) |       |       |
|--------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 38.59   | 39.57                                                     | 40.33 | 42.46 |
| TiO <sub>2</sub>               | 3.69    | 2.89                                                      | 2.63  | 2.85  |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0.02    | —                                                         | —     | —     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.85    | 11.60                                                     | 8.93  | 11.81 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.17    | 2.79                                                      | 2.61  | 3.63  |
| FeO                            | 7.15    | 6.30                                                      | 7.30  | 4.60  |
| MnO                            | 0.22    | 0.10                                                      | 0.14  | 0.10  |
| MgO                            | 19.94   | 10.34                                                     | 11.81 | 6.74  |
| CaO                            | 11.60   | 8.62                                                      | 10.13 | 9.60  |
| SrO                            | 0.09    | —                                                         | —     | —     |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.20    | 2.11                                                      | 0.62  | 2.36  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.44    | 0.81                                                      | 4.42  | 1.76  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.34    | 0.99                                                      | 0.84  | 1.33  |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 0.51    | —                                                         | —     | —     |
| п.п.п.                         | 4.76    | 6.80                                                      | 0.50  | 6.36  |
| S <sub>общ</sub>               | 0.12    | —                                                         | —     | —     |
| CO <sub>2</sub>                | 1.42    | 6.60                                                      | 9.00  | 6.24  |
| F                              | 0.10    | —                                                         | —     | —     |
| Cl                             | 0.01    | —                                                         | —     | —     |
| Сумма                          | 100.17  | 99.52                                                     | 99.26 | 99.84 |

Данные породы отнесены к лампрофирам, поскольку минеральный состав, химический состав минералов и пород Контозерского комплекса (табл. 1) соответствуют определениям лампрофиров других исследователей (Vichi et.al., 2005; Nosova et.al., 2018; Prokopyev et.al., 2020). Количество отобранных нами образцов лампрофиров невелико, поскольку породы Контозерского комплекса в разной степени перекрыты мощным чехлом четвертичных отложений и количество обнажений терригенно-вулканогенной толщи невелико. Поэтому было проведено сравнение с химическими анализами лампрофиров южной Тосканы и восточных Альп (Италия) (табл. 1) (Vichi et.al., 2005).

Главным образом, породы разделяются по содержанию  $\text{CO}_2$  (1.42 мас. % в Контозере, против 6.24–9.0 мас. % в Италии). Также присутствует различие в количестве  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : в породах терригенно-вулканогенной толщи Контозерского комплекса составляет 8.17 мас. %, а в лампрофирах Италии – 2.61–3.63 мас. %, что видимо широким распространением хромшпинелидов в породе.

Далее рассмотрим особенности химического состава пород вулканогенной толщи (табл. 2). Относительно других двух толщ Контозерского комплекса они характеризуются повышенным содержанием щелочей ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) алюминия и кремния. Важно отметить, что породы включают в себя до 2.74 мас. %  $\text{CO}_2$ , это не позволяет нанести породы на диаграмму TAS, поскольку для подобной классификации необходимо, чтобы содержание в породе  $\text{CO}_2$  не превышало 0.5 мас. % (Le Maitre et al., 1989). Однако такая особенность важна для нас, поскольку она говорит о том, что карбонатная составляющая присутствует на всех этапах формирования Контозерского комплекса.

Табл.2 Репрезентативные химические составы пород Контозерского комплекса  
Tab.2 Representative chemical compositions of rocks of the Kontozero complex

| Компонент<br>мас.%      | Вулканогенная толща |          | Карбонатно-терригенная толща |         | Интрузивные нефелиновые сиениты |         |
|-------------------------|---------------------|----------|------------------------------|---------|---------------------------------|---------|
|                         | КТ-28/4             | КТ-40/07 | 6-578.2                      | 6-629.7 | КТ-25/4                         | КТ-18/2 |
| $\text{SiO}_2$          | 51.78               | 52.44    | 14.35                        | 12.23   | 56.33                           | 54.68   |
| $\text{TiO}_2$          | 3.10                | 0.86     | 1.09                         | 1.00    | 0.86                            | 1.10    |
| $\text{ZrO}_2$          | 0.10                | 0.05     | н.у.о                        | н.у.о   | 0.08                            | 0.04    |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 14.45               | 18.97    | 3.23                         | 2.84    | 19.19                           | 19.58   |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 4.22                | 1.42     | 1.27                         | 1.23    | 2.86                            | 2.41    |
| $\text{FeO}$            | 4.13                | 3.06     | 4.11                         | 3.78    | 1.90                            | 1.93    |
| $\text{MnO}$            | 0.18                | 0.13     | 0.34                         | 0.36    | 0.14                            | 0.03    |
| $\text{MgO}$            | 2.15                | 0.42     | 3.70                         | 3.60    | 0.57                            | 0.52    |
| $\text{CaO}$            | 4.65                | 1.23     | 33.36                        | 35.08   | 1.15                            | 1.30    |
| $\text{SrO}$            | 0.25                | 0.44     | 2.45                         | 2.64    | 0.25                            | 0.33    |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 4.97                | 6.24     | 1.14                         | 0.95    | 7.75                            | 7.58    |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 4.54                | 8.08     | 0.29                         | 0.30    | 6.41                            | 7.33    |
| $\text{P}_2\text{O}_5$  | 0.48                | 0.08     | 1.87                         | 1.97    | 0.03                            | 0.05    |
| $\text{ZnO}$            | 0.02                | 0.01     | 0.02                         | 0.02    | н.у.о                           | н.у.о   |
| $\text{TR}_2\text{O}_3$ | 0.06                | н.у.о    | 0.15                         | 0.08    | 0.06                            | 0.03    |
| $\text{H}_2\text{O}^+$  | 0.11                | 0.16     | 0.18                         | 0.07    | 0.14                            | 0.10    |
| П.п.п.                  | 2.02                | 4.10     | 7.17                         | 7.35    | 0.92                            | 1.77    |
| $\text{S}_{\text{общ}}$ | 0.26                | 0.08     | 0.85                         | 0.75    | 0.25                            | 0.04    |
| $\text{CO}_2$           | 2.24                | 1.68     | 24.00                        | 24.72   | 0.70                            | 0.58    |
| F                       | 0.30                | 0.04     | 0.74                         | 0.73    | 0.04                            | 0.12    |
| Cl                      | 0.01                | 0.14     | н.у.о                        | н.у.о   | 0.02                            | 0.01    |
| Сумма                   | 100.03              | 99.51    | 100.31                       | 99.70   | 99.64                           | 99.64   |

Примечание. н.у.о – ниже уровня определения.

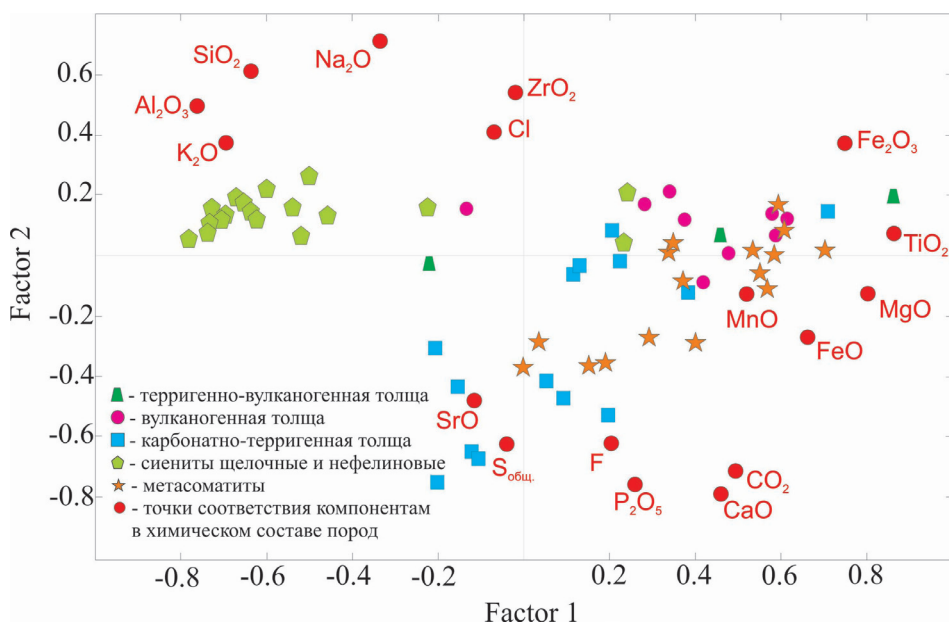


Рис. 5. Результаты факторного анализа для пород Контозерского комплекса, основанные на результатах «мокрой» химии.

Fig. 5. The results of factor analysis of the rocks of the Kontozero complex (based on the results of «wet» chemistry).

Особенности химического состава пород карбонатно-терригенной толщи (табл. 2) заключаются в том, что в них отмечено более высокое содержание  $P_2O_5$ , чем в вулканогенной или в терригенно-вулканогенной толщи и может достигать 1.97 мас. %. Интрузивные нефелиновые сиениты обладают самыми низкими содержаниями  $P_2O_5$  (табл. 2) среди пород Контозерского комплекса – оно не достигает первых процентов. Как и породы вулканогенной толщи, интрузивные породы содержат повышенные концентрации  $CO_2$ .

После того, как был проведен анализ химического состава пород трех основных толщ Контозерского комплекса, а также интрузивных нефелиновых сиенитов, был выполнен факторный анализ. Основная его цель заключается в том, чтобы определить общие параметры, объединяющие связи между наблюдаемыми признаками объекта. Он демонстрирует разделение пород комплекса по двум факторам (рис. 5) и здесь мы наблюдаем два «облака», в которые обособились интрузивные и вулканогенно-осадочные породы, включая метасоматиты.

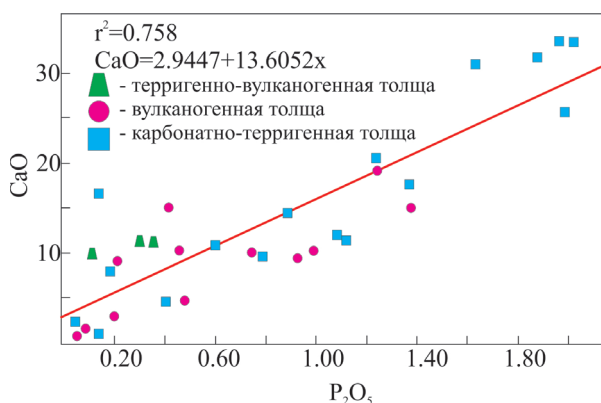


Рис. 6. Корреляционный анализ, диаграмма рассеяния для вулканогенно-осадочных пород Контозерского комплекса: CaO- $P_2O_5$ .

Fig. 6. Correlation analysis, scattering diagram for volcanic-sedimentary rocks of the Kontozero complex: CaO- $P_2O_5$ .

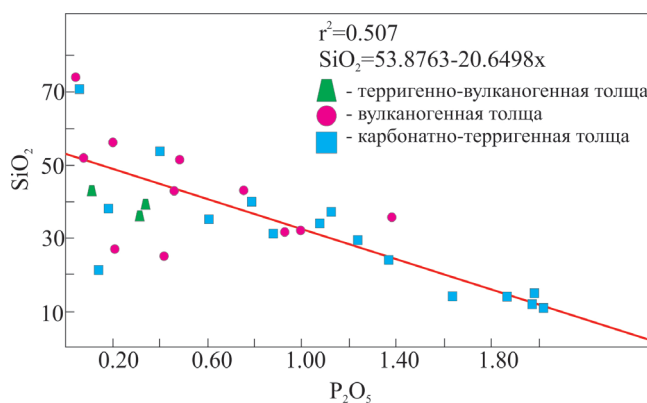


Рис. 7. Корреляционный анализ, диаграмма рассеяния для вулканогенно-осадочных пород Контозерского комплекса: SiO<sub>2</sub>- $P_2O_5$ .

Fig. 7. Correlation analysis, scattering diagram for volcanic-sedimentary rocks of the Kontozero complex: SiO<sub>2</sub>- $P_2O_5$ .

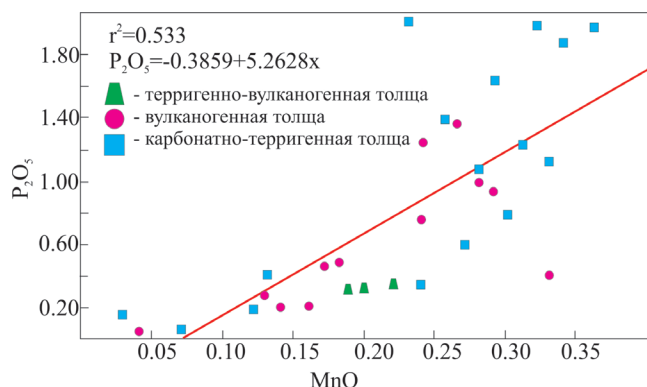


Рис. 8. Корреляционный анализ, диаграмма рассеяния для вулканогенно-осадочных пород Контозерского комплекса:  $P_2O_5$  и  $MnO$ .

Fig. 8. Correlation analysis, scattering diagram for volcanogenic sedimentary rocks of the Kontozero complex:  $P_2O_5$  and  $MnO$ .

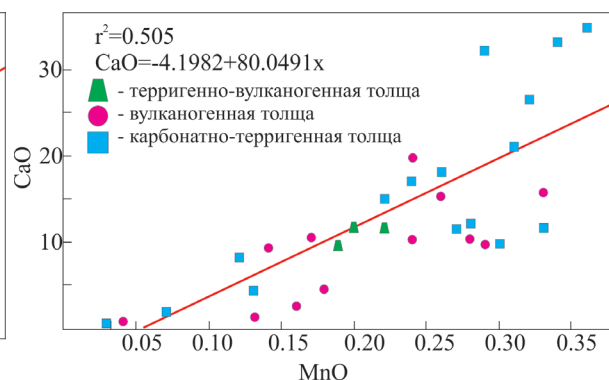


Рис. 9. Корреляционный анализ, диаграмма рассеяния для вулканогенно-осадочных пород Контозерского комплекса:  $MnO$  и  $CaO$ .

Fig. 9. Correlation analysis, scattering diagram for volcanogenic sedimentary rocks of the Kontozero complex:  $MnO$  and  $CaO$ .

По данным факторного анализа фосфор концентрируется преимущественно в вулканогенно-осадочных породах. Нами были выявлены следующие закономерности в распределении фосфора. Положительная корреляция между  $P_2O_5$  и  $CaO$  (рис. 6) указывает на то, что апатит аккумулируется в породах карбонатно-терригенной толщи. В подтверждение этого в породах отмечена отрицательная корреляция между  $P_2O_5$  и  $SiO_2$  (рис. 7).

Наблюдаемая положительная корреляция между  $P_2O_5$  и  $MnO$  (рис. 8) объясняется тем, что апатит концентрируется преимущественно в поздних, обогащенных марганцем, карбонатных породах. В подтверждение этому присутствует положительная корреляция между  $MnO$  и  $CaO$  (рис. 9), подтверждающая, что с ростом кальция увеличивается концентрация марганца в породах. Кроме того, марганец может изоморфно входить как в состав апатита, так и доломита.

### Заключение

Геология Контозерского вулканогенно-осадочного комплекса является сложной и разнообразной. В ходе его эволюции была проявлена интрузивная, вулканическая, метасоматическая деятельность. Все эти процессы отражаются в петрохимии пород комплекса. Основные заключения, вытекающие из проведенного исследования пород следующие:

1. Вулканические силикатные породы содержат повышенное содержание  $CO_2$ , которое выражено в появлении кальцитовых оцеллей в лампрофирах и первичного кальцита в феолитах. Таким образом, карбонат присутствует на всех стадиях развития комплекса, а на более поздней проявился карбонатитовый вулканизм.
2. Породы, слагающие Контозерский комплекс по особенностям химического состава разделяются на две основные группы: интрузивные и вулканогенно-осадочные.
3. Фторапатит концентрируется в вулканогенно-осадочных породах, причем преимущественно в поздних породах карбонатно-терригенной толщи, поскольку наблюдаются положительные корреляции между концентрацией фосфора и кальция, а также между концентрацией фосфора и марганца.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ 21-47-09010.

### Литература

1. Кириченко Л.А., Контозерская серия каменноугольных пород на Кольском полуострова. Л.: Недра, 1970. 110 с.
2. Le Maitre R.W.A., Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks // Blackwell: Oxford, UK. 1989. 193 p.

3. Nosova A.A., Sazonova L.V., Kargin A.V., Smirnova M.D., Lapin A.V., Shcherbakov V.D. Olivine in ultramafic lamprophyres: chemistry, crystallisation, and melt sources of Siberian Pre-and post-trap aillikites // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2018. V. 173. P. 1–27.
4. Prokopyev I., Starikova A., Doroshkevich A., Nugumanova Y. & Potapov V. Petrogenesis of ultramafic lamprophyres from the Terina complex (Chadobets upland, Russia): Mineralogy and melt inclusion composition // *Minerals*. 2020. V. 10(5). P. 419.
5. Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Kjarsgaard B.A. Integrating ultramafic lamprophyres into the IUGS classification of igneous rocks: Rationale and implications // *Journal of Petrology*. 2005. V. 46. P. 1893–1900.
6. Vichi G., Stoppa F. & Wall F. The carbonate fraction in carbonatitic Italian lamprophyres // *Lithos*. 2005. V. 85(1–4). P. 154–170.