

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.3.80-86

УДК 551+552.4 (234.74)

## ГЕОДИНАМИКА КЕЙВСКОГО ДОМЕНА: ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ\*

Н. Е. Козлов<sup>1</sup>, Н. О. Сорохтин<sup>2</sup>, Н. О. Мартынов<sup>1</sup>, Т. С. Марчук<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Геологический институт Кольского научного центра РАН

<sup>2</sup>ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН

<sup>3</sup>Апатитский филиал ФГБОУ ВО «Мурманский государственный технический университет»

### Аннотация

С помощью петрогеохимической информации о составе древнейших комплексов архея Кольского региона проверена гипотеза, основанная на геолого-структурных и геофизических данных, согласно которым Кейвский микроконтинент на определенном этапе геологического развития был погружен на некоторую глубину надвинувшимися на него соседними континентальными массивами. В основу исследований легло предположение о том, что в рамках предложенной модели формирования породных ассоциаций Кейвской структуры различные ее области должны были бы в разной степени быть сходны с веществом окружающих ее доменов. При решении задачи был использован метод определения близости между исследуемыми объектами на основе выделения однородных групп. Итоги сопоставления, полученные в результате моделирования петрохимических данных, не противоречат предложенной ранее на основании геолого-геофизических данных модели формирования Кейвской структуры в условиях, характерных для срединных массивов.

### Ключевые слова:

*региональная геология, докембрийские комплексы, супракрупальные породы, протолиты, эволюция состава, реконструкция, геодинамика.*

## GEODYNAMICS OF THE KEIVY DOMAIN: A PETROGEOCHEMICAL ASPECT

Nikolai E. Kozlov<sup>1</sup>, Nikolai O. Sorokhtin<sup>2</sup>, Evgeniy V. Martynov<sup>1</sup>, Tatyana S. Marchuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Geological Institute of KSC RAS

<sup>2</sup>P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS

<sup>3</sup>AB Murmansk State Technical University

### Abstract

Petrogeochemical data on the composition of ancient Archean complexes in the Kola region have been used to justify a hypothesis based on geological-structural and geophysical data. According to these data, at a certain stage of the geological evolution the Keivy microcontinent was submerged to some depth by adjacent continental massifs that were thrust over it. The studies are based on the assumption that in the framework of the suggested evolutionary model of rock associations in the Keivy structure, its different areas should be similar to the substance of neighboring domains. The method of determining the proximity between the study objects by defining homogenous groups has been applied to solve the task. Results of the comparison obtained by modeling of petrochemical data do not contradict the model of the Keivy structure evolution under conditions typical of median massifs, which was earlier suggested based on geological-geophysical data.

### Keywords:

*regional geology, Precambrian complexes, supracrustal rocks, protoliths, evolution of composition, reconstruction, geodynamics*

### Введение

Кейвский домен расположен в центральной части Кольского п-ова, на востоке и западе гранича с Кольско-Норвежским, на севере — с Мурманским доменами. С юга он ограничен раннепротерозойскими образованиями Печенга-Имандра-Варзуга-Устьпонойского зеленокаменного

\* Работа выполнена в рамках государственного задания, темы: № 02226-2019-0052, № 0149-2019-0005.

пояса (рис. 1). Традиционно в пределы Кейвского домена включают область развития архейских магматических континентально-коровых образований, тектонически причлененных к покрытому осадочно-вулканогенным чехлом Кейвскому домену в юго-западной его части. Данная структура может рассматриваться как особый домен Кольского докембрийского глубинного коллизииона [1].

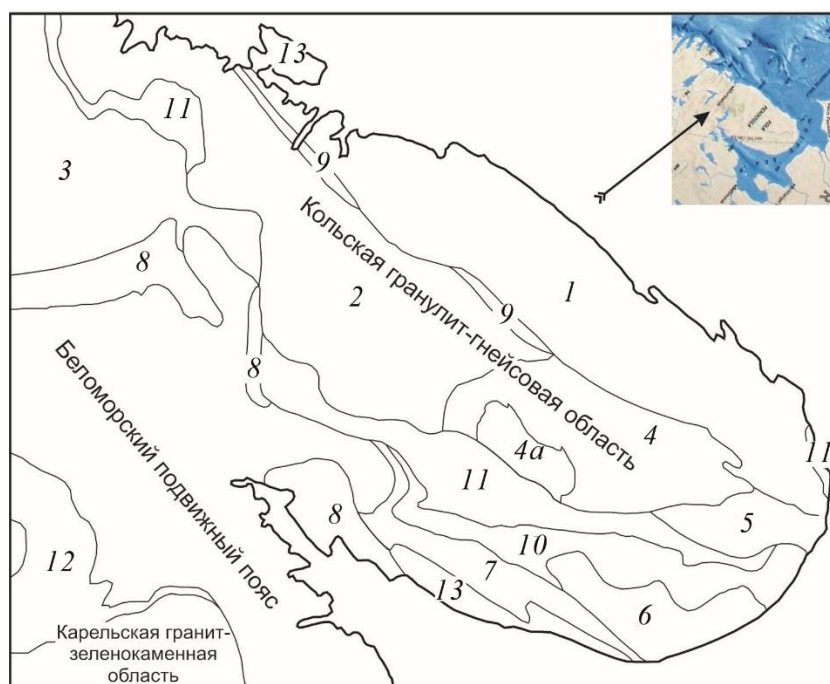


Рис. 1. Схема районирования раннедокембрийских геоструктурных элементов земной коры северо-восточной части Балтийского щита (по [8], с дополнениями).

Домены коры: 1 — Мурманский; 2 — Кольско-Норвежский; 3 — Лоттинский; 4 — Кейвский; 4а — Верхнепонойский; 5 — Восточно-Кольский; 6 — Чапомский; 7 — Терский. Зеленокаменные и гранулитовые пояса: 8–10 — архейские: 8 — Лапландско-Колвический; 9 — Титовско-Колмозерский (Колмозеро-Воронья); 10 — Сергозерско-Стрельнинский; 11, 12 — неопротерозойские: 11 — Печенга-Имандра-Варзуга-Устьпонойский; 12 — Северо-Карельский; 13 — рифтогенные и окраинно-континентальные отложения рифейского возраста

Fig. 1. Zoning of the early Precambrian geostuctural elements of the Earth's crust in the NE Baltic Shield (as supplemented after [8]).

Crustal domains: 1 — Murmansk, 2 — Kola-Norwegian, 3 — Lotta, 4 — Keivy, 4a — Verkhneponoysky, 5 — Eastern Kola, 6 — Chapoma, 7 — Tersky. Greenstone and granulite belts: 8–10 — Archean: 8 — Lapland-Kolvitsa; 9 — Titovka-Kolmozero (Kolmozero-Voronya); 10 — Sergozersky-Strelninsky; 11, 12 — Neoproterozoic: 11 — Pechenga-Imandra-Varzuga-Ustponoysky; 12 — Northern-Karelian; 13 — Riphean rift and continental marginal sediments

Супракрустальные комплексы структуры детально описаны рядом авторов [2, 3]. Породы представлены главным образом биотитовыми и амфиболовыми гнейсами, двупироксеновыми кристаллосланцами и гранат-биотитовыми гнейсами. Интрузивный комплекс сложен габбро-анортозитами, калиевыми и щелочными гранитами. U-Pb-возраст цирконов из метаморфизованных риодацитов лебяжинской свиты составляет  $2871 \pm 15$  млн лет [4]. Авторы в серии работ, посвященных Кейвскому домену, рассмотрели возможные причины своеобразия слагающих его породных ассоциаций, в качестве одной из них назвав региональные метасоматические процессы, генетически связанные с комплексами щелочных гранитов [5], для которых надежно установлен возраст  $2751 \pm 41$  млн лет, [4]. Изучение особенностей состава метавулканитов основного состава из низов разреза Кейвской структуры позволяет предполагать, что их протолиты могли быть древнейшими в пределах Кольского региона образованиями [6, 7].

Детальное геолого-петрогеохимическое исследование метаморфитов Кейвского домена позволило авторам ранее показать [8], что данная структура может рассматриваться как особый домен, расположенный внутри Кольского раннедокембрийского глубинного коллизииона.

При этом не устанавливается предпочтительной близости кейвских образований к какому-либо типу структур (гранит-зеленокаменных или гранулит-гнейсовых). Напомним также, что по характеру геодинамической эволюции архейский этап развития Кейвского домена резко отличается от всех континентально-коровых образований восточной части Балтийского щита. Наиболее ранними вещественными комплексами являются осадочно-вулканогенные образования чехольного типа. Имеющиеся данные свидетельствуют о практически непрерывном накоплении во внутренних областях домена осадочно-вулканогенного комплекса, реализующегося в режиме кратонизации.

Геолого-структурные и геофизические данные позволяют предположить [8], что Кейвский микроконтинент на определенном этапе геологического развития был погружен на некоторую глубину надвинувшимися на него соседними континентальными массивами, после чего в неорхее, в ребольскую фазу складчатости, были сформированы опоясывающие эту структуру орогенные пояса (рис. 2). В итоге коллизионные процессы позднеархейского возраста привели к формированию в центральной части Кольского п-ова структуры, сравнимой со срединными массивами более молодых структур, например с Южно-Китайской или Китайско-Корейской плитой. Такая модель развития хорошо объясняет факт последующего внедрения щелочных гранитов на рубеже архея и протерозоя, развитых по периферии домена и опоясывающих его внутренние области.

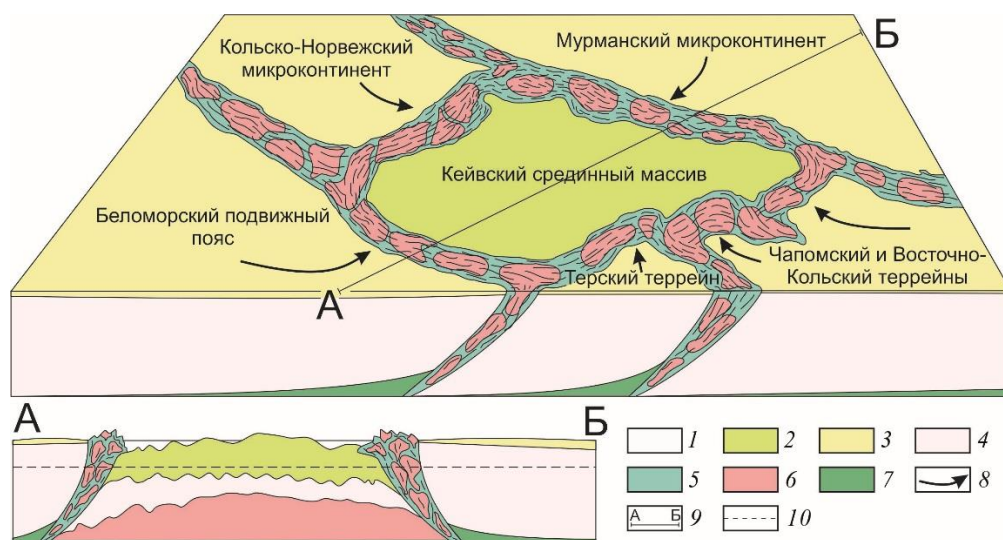


Рис. 2. Закономерности формирования Кейвского срединного массива в позднем архее:  
 1 — водный бассейн; 2 — осадочный чехол Кейвского срединного массива; 3 — осадочный чехол сопредельных террейнов и микроконтинентов; 4 — континентальная кора; 5 — складчатые образования зеленокаменного типа; 6 — синорогенные тоналит-трондьемиты, гранодиориты, мигматит граниты и ремобилизованная кора Кейвского срединного массива; 7 — подкоровая мантия; 8 — направление коллизионного надвигания микроконтинентов и террейнов на Кейвский срединный массив;  
 9 — линия разреза; 10 — современный уровень эрозионного среза

Fig. 2. Peculiar features of the Keivy median massif formation in the late Archean:  
 1 — water basin; 2 — sedimentary cover of the Keivy median massif; 3 — sedimentary cover of adjacent terrains and microcontinents; 4 — continental crust; 5 — folds of the greenstone type; 6 — synorogenic tonalite-trondhjemites, granodiorites, migmatite granites and remobilized crust of the Keivy median massif; 7 — subcrustal mantle; 8 — direction of collisional thrusting of microcontinents and terrains over the Keivy median massif;  
 9 — section line; 10 — contemporary level of the erosional truncation

### Методика исследования и обсуждение результатов

В настоящей работе предпринята попытка поиска черт состава супракrustальных комплексов, подтверждающих или опровергающих на вещественном уровне описанные выше геодинамические построения. В основу этих исследований было положено предположение

о том, что в рамках предложенной модели формирования породных комплексов Кейвской структуры различные ее области должны были бы в разной степени быть сходны с веществом окружающих ее доменов (рис. 2, 3). Так, ее северная часть должна была бы иметь более существенное сходство с породами Мурманского домена, чем южная. Южная же, наоборот, должна была бы иметь черты большего сходства с породными ассоциациями Терского домена и Беломорского подвижного пояса, чем северная ее часть. Аналогичным образом должно было бы проявиться сходство западной и восточной частей Кейвского блока и Кольско-Норвежского блока. Ввиду отсутствия необходимых данных о составе пород Чапомского и Восточно-Кольского террейнов возможное сходство или отличие пород с породами восточного-юго-восточного обрамления Кейвской структуры не проводилось.

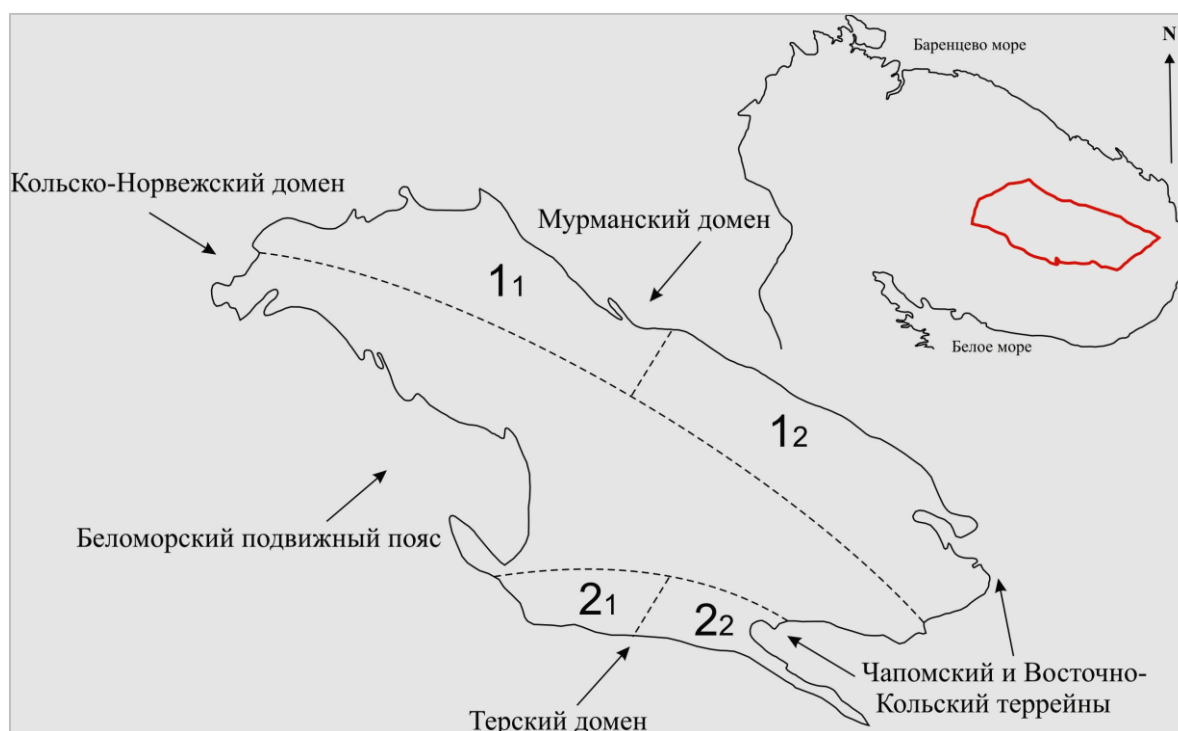


Рис. 3. Схема расположения исследуемых участков в пределах Кейвского домена

Fig. 3. Scheme of location of the study areas within the Keivy domain

Известно, что для реконструкции состава пород питающих провинций наиболее часто используется информация о составе галек конгломератов и обломочных компонентов песчаников. Однако для докембрийских объектов эти образования являются достаточно экзотичными и труднодоступными для исследования. В связи с этим уже довольно продолжительное время для получения информации об особенностях формирования докембрийских осадочных комплексов успешно используются данные о составе метапелитов, обладающих низкой проницаемостью для постседиментационных флюидов, существенно лучше перемешанных и гомогенизированных по сравнению с более крупнозернистыми отложениями [9, 10]. Поскольку в пределах Кейвской структуры данные образования являются одними из наиболее типичных [8], в настоящей работе был исследован их состав.

При решении данной задачи был использован метод определения близости между исследуемыми объектами на основе выделения однородных групп [11], а именно между породными ассоциациями Кейвского домена и окружающими его структурами: Мурманским доменом — с севера, Беломорским подвижным поясом и Терским доменом — с юга, Кольско-Норвежским доменом — с запада, Чапомским и Восточно-Кольским террейнами — с востока. Суть этого метода заключается в следующем.

На первом этапе сравнения берется первая пара объектов (рис. 4), например, Кейвский (X) и Мурманский (Y) домены, которые представлены множествами  $n$ -мерных векторов  $X = \{X_i \mid 1 \leq i \leq l\}$  и  $Y = \{Y_j \mid 1 \leq j \leq m\}$ . Необходимо оценить близость множества точек X до множества Y. Для этого предлагается использовать следующую процедуру:

1) множество Y разбивается на однородные группы  $\{Y_k\}$ . Для каждого вектора  $X_i \in X$  вычисляется евклидово расстояние (близость) до выпуклой оболочки каждой из найденных однородных групп  $\{co(Y_k)\}$ , т. е.  $\rho(X_i, co(Y_k))$ . Потом из множества  $\{\rho(X_i, co(Y_k))\}$  находятся минимальные расстояния до выпуклых оболочек каждой из таких однородных групп  $Y_k$ , т. е.  $r_{ik} = \min_k \rho(X_i, co(Y_k))$ ;

2) для полученного таким образом множества  $R_1 = \{r_{ik}\}$  вычисляется его медиана  $Me(R_1)$ ;

3) эту медиану  $Me(R_1)$  принимаем за оценку близости объекта X к объекту Y, т. е.  $R(X, Y)$ .

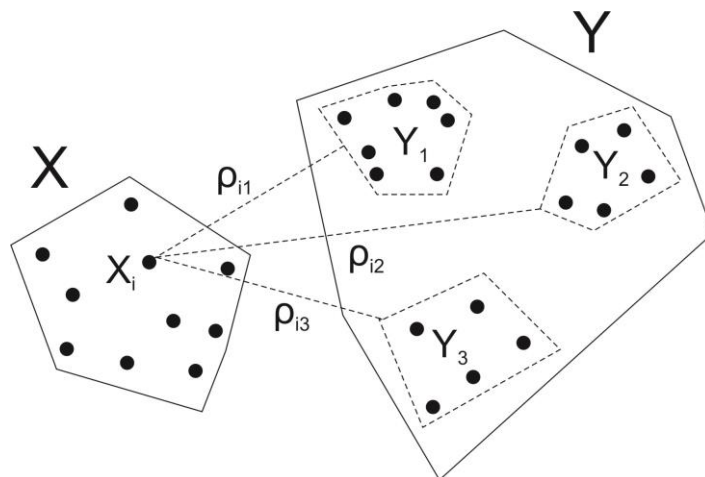


Рис. 4. Определение близости между исследуемыми объектами X и Y, где  $X_i$  — выбранный  $n$ -мерный вектор,  $\{Y_1, Y_2, Y_3\}$  — однородные группы (штриховкой обозначены границы выпуклых оболочек однородных групп)  $\{\rho_1, \rho_2, \rho_3\}$  — расстояния от  $X_i$  до выпуклых оболочек однородных групп, т. е. до  $\{co(Y_1), co(Y_2), co(Y_3)\}$

Fig. 4. Defining the proximity between study objects X and Y, where  $X_i$  is a selected  $n$ -dimensional vector,  $\{Y_1, Y_2, Y_3\}$  — homogenous groups (hatching indicates borders of convex hulls of homogenous groups),  $\{\rho_1, \rho_2, \rho_3\}$  — distances from  $X_i$  to convex hulls of homogenous groups, i. e. to  $\{co(Y_1), co(Y_2), co(Y_3)\}$

Затем заново проводятся процедуры, описанные в пунктах 1, 2 и 3, но только для следующих сравниваемых пар:

- Кейвский и Кольско-Норвежский домены;
- Кейвский домен и Беломорский подвижный пояс в совокупности с Терским доменом.

Таким образом, мы получаем три множества:

$R_1$  — близости пород Кейвского домена к породным ассоциациям Мурманского домена;

$R_2$  — близости образований Кейвского домена к породам Кольско-Норвежского домена;

$R_3$  — близости метаморфитов Кейвской структуры к породам супракрустальных комплексов Беломорского подвижного пояса совместно с породами Терского домена.

На заключительном этапе моделирования вычисляется статистика Пури — Сена — Тамуры для множеств  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , которая позволяет оценить статистическую значимость полученных отличий метапелитов Кейв от пород окружающих его структур. В таблице ниже приведены «коэффициенты близости» ( $Me(R_1)$ ,  $Me(R_2)$  и  $Me(R_3)$ ) состава пород исследуемой Кейвской структуры до соответствующих сравниваемых объектов и значения статистик Пури — Сена — Тамуры. Чем меньше значения приведенных коэффициентов (полужирный шрифт), тем ближе сравниваемые объекты.

Далее последовательно проводилось сопоставление с породами каждого из окружающих Кейвскую структуру доменов, что позволяло оценить сходство вещества той или иной ее части с каждым из них, при этом исключалась возможность влияния на полученный результат вещества

какого-либо из доменов в случае абсолютного преобладания его в разрезах метаосадочных пород Кейв. Центральная часть Кейвской структуры, где наиболее активно могло происходить смешение материала окружающих ее доменов, из исследования была исключена.

Итоги сопоставления полученных в результате математического моделирования данных подтверждают предложенную выше геолого-геофизическую модель развития Кейвской структуры в раннем докембрии.

Сравнение состава метапелитов соответствующих частей Кейвской структуры с породами окружающих ее доменов (см. рис. 2, 3)

Comparison of compositions of metapelites in respective areas of the Keivy structure with rocks of surrounding domains (see Figs. 2, 3)

Кейвский домен Keivy domain	Мурманский блок Murmansk block	Беломорский подвижный пояс и Терский домен White Sea mobile belt and Tersky domain	Кольско-Норвежский домен Kola-Norwegian domain
Северная часть (группы 1 <sub>1</sub> и 1 <sub>2</sub> на рис. 3) Northern part (groups 1 <sub>1</sub> and 1 <sub>2</sub> in Fig. 3)	<b>7,898*</b>	9,402	
Южная часть (группы 2 <sub>1</sub> и 2 <sub>2</sub> на рис. 3) Southern part (groups 2 <sub>1</sub> and 2 <sub>2</sub> in Fig. 3)	9,432	<b>8,781</b>	
Западная часть (группы 1 <sub>1</sub> и 2 <sub>1</sub> на рис. 3) Western part (groups 1 <sub>1</sub> and 2 <sub>1</sub> in Fig. 3)			<b>7,773</b>
Восточная часть (группы 1 <sub>2</sub> и 2 <sub>2</sub> на рис. 3) Eastern part (groups 1 <sub>2</sub> and 2 <sub>2</sub> in Fig. 3)			10,435

\* Коэффициенты близости кейвских метапелитов к породам той или иной структуры. Полу жирным шрифтом выделены значения, характеризующие максимальную близость сравниваемых объектов при выбранном уровне значимости 0,01.

\* Coefficients of proximity of the Keivy metapelites to rocks of one structure or another. Values characterizing the maximal proximity of the compared objects with the selected significance level of 0,01 are marked in bold.

## Выводы

Полученные результаты исследования состава метапелитов в пределах различных частей Кейвского домена не противоречат предложенной ранее на основании геолого-геофизических данных модели его формирования в условиях, характерных для срединных массивов. Принадлежность Кейвского домена к структурам такого типа, с которыми часто связаны месторождения углеводородов, позволяет лучше понять причины появления в кристаллических сланцах Кейв «метанового» графита [12].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кольский глубинный раннедокембрийский коллизон: новые данные по геологии, геохронологии, геодинамике и металлогении / Ф. П. Митрофанов [и др.] // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 1997. Вып. 3, № 21. С. 5–18.
2. Бельков И. В. Кианитовые сланцы Кейв. М.; Л., 1963. 321. С. 2.
3. Геология рудных районов Мурманской области / В. И. Пожиленко [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 359 с.
4. Позднеархейский возраст кислых метавулканитов района Малых Кейв (Кольский полуостров) / О. А. Беляев [и др.] // Докл. РАН. 2001. Т. 379, № 5. С. 651–654.
5. О причине своеобразия состава пород Кейвского домена (Кольский полуостров) / Н. Е. Козлов [и др.] // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 1. С. 83–94. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/1-83-94.
6. Козлов Н. Е., Сорохтин Н. О., Мартынов Е. В. Эволюция вещественного состава супракрустальных комплексов архея Кольского региона // Вестник ИГ Коми НЦ СО РАН. 2015. № 1. С. 3–6.
7. Kozlov N. E., Sorokhtin N. O., Martynov E. V. Geodynamic Evolution and Metallogeny of Archaean Structural and Compositional Complexes in the Northwestern Russian Arctic // Minerals. 2018. No. 8 (12). 573 p. URL: <https://doi.org/10.3390/min8120573>.
8. Геология архея Балтийского щита / Н. Е. Козлов [и др.]. СПб.: Наука, 2006. 329 с.
9. Composition of sediment provenances and patterns in geological history of the Late Vendian Mezen Basin / A. V. Maslov [et al.] // Lithology and Mineral Resources. 2008. Vol. 43, No. 3. P. 260–280.
10. Lithochemochemistry of Vendian fine-grained clastic rocks in the Nepa-Zhuya region of the Siberian Platform / V. N. Podkovyrov [et al.] // Lithology and Mineral

Resources. 2015. Vol. 50, No. 4. P. 299–310. **11.** *Мартынов Е. В.* Реконструкция обстановок формирования протолитов метаморфических комплексов докембрия на основе статистического моделирования их характеристик по петрогеохимическим данным: автореф. дис. ... канд. геол.-минералог. наук. СПб., 1997. 24 с. **12.** Carbon Sources and the Graphitization of Carbonaceous Matter in Precambrian Rocks of the Keivy Terrane (Kola Peninsula, Russia) / *E. Fomina [et al.]* // *Minerals*. 2019. No. 9 (2). 94. URL: <https://doi.org/10.3390/min9020094>.

### Сведения об авторах

*Козлов Николай Евгеньевич* — доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор Геологического института КНЦ РАН

E-mail: [kozlov.n.e@yandex.ru](mailto:kozlov.n.e@yandex.ru)

*Сорохтин Николай Олегович* — доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

E-mail: [nsorokhtin@mail.ru](mailto:nsorokhtin@mail.ru)

*Мартынов Евгений Васильевич* — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: [mart@geoksc.apatity.ru](mailto:mart@geoksc.apatity.ru)

*Марчук Татьяна Сергеевна* — студент магистратуры АФ МГТУ

E-mail: [marchuk@geoksc.apatity.ru](mailto:marchuk@geoksc.apatity.ru)

### Author Affiliation

*Nikolai E. Kozlov* — Dr. Sci. (Geology & Mineralogy), Professor, Director of the Geological Institute of KSC RAS

E-mail: [kozlov.n.e@yandex.ru](mailto:kozlov.n.e@yandex.ru)

*Nikolai O. Sorokhtin* — Dr. Sci. (Geology & Mineralogy), Chief Researcher of P. P. Shishov Institute of Oceanology of RAS

E-mail: [nsorokhtin@mail.ru](mailto:nsorokhtin@mail.ru)

*Evgeniy V. Martynov* — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of KSC RAS

E-mail: [mart@geoksc.apatity.ru](mailto:mart@geoksc.apatity.ru)

*Tatyana S. Marchuk* — Graduate Student of AB Murmansk State Technical University

E-mail: [marchuk@geoksc.apatity.ru](mailto:marchuk@geoksc.apatity.ru)

### Библиографическое описание статьи

Геодинамика Кейвского домена: петрогеохимический аспект / *Н. Е. Козлов [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 3 (11). — С. 80–86.

### Reference

*Kozlov Nikolai E., Sorokhtin Nikolai O., Martynov Evgeniy V., Marchuk Tatyana S.* Geodynamics of the Keivy Domain: a Petrogeochemical Aspect. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2019, vol. 3 (11), pp. 80–86. (In Russ.).