

УДК 551.24+551.71+550.4

ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Н. Е. Козлов^{1*}, Н. О. Сорохтин^{1,2}

¹ Геологический институт Кольского научного центра РАН (ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Россия, 184209), *kozlov.n.e@yandex.ru

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Нахимовский пр., 36, Москва, Россия, 117997)

Описаны методы реконструкции условий формирования протолитов древнейших комплексов, позволяющие вводить поправку на химическую эволюцию вещества Земли и дающие возможность при геодинамических реконструкциях в докембрии более корректно оперировать понятием тенденций изменения режимов, не проводя полных аналогий с фанерозоем, а также методы поиска единого тренда эволюции состава для нескольких изначально заданных последовательностей объектов. Возможности этих методов проиллюстрированы на примере изучения архейских комплексов Кольского региона.

Ключевые слова: докембрий; методы геодинамических реконструкций; поиск трендов отличий

Для цитирования: Козлов Н. Е., Сорохтин Н. О. Возможности и ограничения петрогеохимических методов при изучении истории развития докембрийских комплексов // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 50–54. doi: 10.17076/geo1659

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке тем НИР ГИ КНЦ РАН и ИО РАН (FMEZ-2022-0025, FMWE-2021-0004).

N. E. Kozlov^{1*}, N. O. Sorokhtin^{1,2}. POSSIBILITIES AND CONSTRAINTS OF PETROGEOCHEMICAL METHODS IN THE STUDY OF PRECAMBRIAN COMPLEX EVOLUTION HISTORY

¹ Geological Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences (14 Fersman St., 184209 Apatity, Russia), *kozlov.n.e@yandex.ru

² P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (36 Nakhimovsky Ave., 117997 Moscow, Russia)

The paper describes methods for reconstructing the formation settings for protoliths of ancient complexes that facilitate adjustment to the chemical evolution of the Earth matter and enable a more correct application of the concept of trends in regime changes in geodynamic reconstructions of the Precambrian, avoiding full analogies with the

Phanerozoic. In addition, we describe methods for finding a common trend in the compositional evolution for several given sequences of objects. Possibilities of these methods are demonstrated using the example of Archaean complexes in the Kola region.

Keywords: Precambrian; geodynamic reconstruction methods; search for difference trends

For citation: Kozlov N. E., Sorokhtin N. O. Possibilities and constraints of petro-geochemical methods in the study of Precambrian complex evolution history. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:50–54. doi: 10.17076/geo1659

Funding. The study was carried out within government-funded research themes of the Geological Institute KSC RAS and Institute of Oceanology RAS (FMEZ-2022-0025, FMWE-2021-0004).

Геология докембрия имеет свои особые черты, связанные со специфичностью этого периода, поэтому ее изучение требует привлечения не только традиционных, апробированных на фанерозойских объектах методов, но и иных подходов, иногда различных даже при исследовании отдельных периодов длительной докембрийской истории. Авторы настоящей работы занимаются данной проблемой достаточно давно [Козлов, 1995; Козлов и др., 1999, 2014, 2017; Kozlov et al., 2018; Sorokhtin et al., 2020 и др.]. Наиболее важная особенность нашего подхода к ее решению – все методы расчетов, построения и т. д. основаны на математических законах и строгих методах обработки данных. Это позволяет, по крайней мере на исходной стадии, до интерпретации результатов, работать с объективной информацией.

Кроме того, сопоставление вещественного состава пород проводится нами в многомерном пространстве, где границы, разделяющие поля фигуративных точек пород, достаточно устойчивы. Сравнение объектов таким способом является более корректным, позволяя дать математически обоснованный ответ на вопрос, к какому из эталонов наиболее близок наш исследуемый объект, не будучи, строго говоря, идентичным ни одному из них. И, наконец, нами разработан метод поиска единого тренда для нескольких изначально заданных последовательностей объектов [Козлов и др., 2014; Sorokhtin et al., 2020], что позволяет определять на нем место любого иного объекта, ранее не использованного в качестве основы для его поиска.

Следует напомнить, что между составом базальтов фанерозоя и метабазальтов докембрия нами были выявлены устойчивые системные отличия [Козлов и др., 1999]. Таким образом, процессы химической эволю-

ции вещества в ходе геологического времени накладывают ограничения на использование принципа актуализма при изучении раннедокембрийских комплексов. Поэтому при проведении параллелей между докембрийскими и фанерозойскими породными комплексами необходимо исходить из предположения о специфичности докембрийского периода развития планеты, с одной стороны, и некоторой общности в характере реализации геодинамических обстановок на всем протяжении геологической истории, с другой. Данный подход был сформулирован ранее [Козлов, 1995] как положение о гомологичных рядах геодинамических режимов, что реализуется при изучении раннедокембрийских комплексов древнейших щитов.

По нашему мнению, для получения достоверных результатов при сопоставлении состава древнейших породных ассоциаций и фанерозойских гомологов необходим учет отличий состава докембрийских образований относительно фанерозойских эталонов (то есть в данном случае «смещения» состава докембрийских метабазальтов в многомерном пространстве относительно базальтов фанерозоя) и только после этого – поиск эталона, максимально сходного с исследуемым объектом. В этой связи значительный интерес при решении задач реконструкции представляют теоретические данные, количественно описывающие эволюционные процессы. Методика учета информации о возможной петрогеохимической эволюции мантии, значимо повышающая достоверность реконструкций, описана ранее [Козлов и др., 2017].

В то же время использование этой информации о петрогеохимической эволюции мантии носит в определенной мере субъективный характер, поскольку характеристики исследуемого объекта вычисляются по формуле:

$X^* = \{x_i + \beta \cdot v\}$ ($i = 1, \dots, n$), где v – вектор «смещения» химического состава мантии во времени, а β – некоторый коэффициент, который вычисляется в интерактивном режиме, характеризуя отличия по химизму состава мантии от пород основного состава в выбранный момент времени и изменяясь в зависимости от этого.

С учетом изложенного для реконструкции раннедокембрийских геодинамических режимов был разработан дополнительный метод, более эффективный в сравнении с теми, которые использовались авторами ранее [Kozlov et al., 2018; Sorokhtin et al., 2020]. Смещение объектов докембрия относительно эталонов фанерозоя в признаковом пространстве (объекты докембрия и эталоны фанерозоя, представленные множествами фигуративных точек) предлагается описывать при помощи поверхности второго порядка, разделяющей совокупности объектов докембрия и фанерозоя. Критерием того, что эта поверхность является разделяющей, служит статистическая значимость отличия между множествами фигуративных точек каждого объекта с множествами проекций этих точек на вышеуказанную поверхность, при том что множества фигуративных точек объектов докембрия и фанерозоя расположены по разные стороны этой поверхности. Используется оптимальная разделяющая поверхность, для которой минимальная близость всей совокупности объектов к поверхности – максимальна.

Тем не менее и этот метод не всегда позволяет давать однозначный ответ об отнесении геодинамической обстановки формирования протолитов некоторых из исследованных докембрийских комплексов к какому-либо одному конкретному типу. В связи с чем наиболее корректным мы полагаем описание тех или иных тенденций эволюции этих обстановок.

Еще одной проблемой, которая часто стоит перед исследователями раннедокембрийских комплексов, является поиск линейного упорядочения геологических объектов (например, по времени формирования протолитов слагающих их пород) на основе заданного отношения частичного порядка. Чтобы перейти от частичного порядка к линейному, был предложен следующий метод: находится линейный тренд F из условия наилучшего (статистически значимого) относительно рангового критерия Пури – Сена – Тамуры) разделения совокупностей проекций химических составов пород изучаемых структур (многомерных величин) на этот тренд [Sorokhtin et al., 2020].

Этот метод был использован при решении задачи поиска возможного тренда изменения состава архейских пород от более молодых к

более древним для структур Кольского полуострова [Kozlov et al., 2018]. В сочетании с методом реконструкции геодинамических режимов формирования протолитов исследованных комплексов пород при помощи поверхности второго порядка, разделяющей объекты докембрия и фанерозоя, эти исследования позволили установить тенденцию смены режимов, по петрогеохимическим характеристикам наиболее сходных с траппами, режимами, более близкими к континентальным рифтам и затем к островодужным [Kozlov et al., 2018]. Данная ситуация не является исключением. Так, подобная смена плюмового магматизма субдукционным в пределах одного региона ограниченной площади описана, к примеру, для более молодых комплексов Центральной и Восточной Арктики [Добрецов и др., 2013].

Другим примером результативности использования наших методик может служить изучение Кейвского террейна. Проведенные в пределах Кейвского микроконтинента исследования показали, что в неоархее он был погружен на некоторую глубину надвинувшимися на него соседними континентальными доменами коры Кольского региона [Sorokhtin et al., 2020]. В результате этого Кейвский микроконтинент можно считать одним из древнейших срединных массивов докембрийской континентальной коры.

Была предпринята попытка поиска особенностей состава супракрустальных комплексов различных частей Кейвского домена, подтверждающих или опровергающих на вещественном уровне описанные выше геодинамические построения. В основу этих исследований было положено предположение, что в рамках предложенной модели формирования породных комплексов Кейвской структуры различные ее области должны были бы в разной степени походить по составу на вещество окружающих ее доменов. Так, ее северная часть должна была бы иметь более существенное сходство с породами Мурманского домена, чем южная. Южная же, напротив, 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, соответственно, сходство пород западной и восточной частей Кейвского и Кольско-Норвежского доменов. Итоги сопоставления полученных в результате математического моделирования данных подтверждают предложенную выше геолого-геофизическую модель развития Кейвской структуры в раннем докембрии [Sorokhtin et al., 2020].

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

– эволюция состава метавулканитов в ходе геологического времени накладывает ограничения на применение принципа актуализма для различного рода реконструкций при исследовании древнейших комплексов. С учетом этого более корректным при реконструкции геодинамических обстановок раннего докембрия представляется использование не данных о близости к тому или иному режиму фанерозоя, а тенденций изменения величины сходства-различия с теми или иными из них;

– с использованием предложенных нами методик установлено, что при формировании древнейших породных ассоциаций Кольского региона происходила смена геодинамических режимов, наиболее сходных с траппами, обстановками, более близкими к островодужным. Данные о составе пород Кейвского домена в сравнении с породами его обрамления подтверждают его формирование как древнейшего срединного массива. Установлено, что процессы формирования Кольского орогена имели выраженную пространственно-временную зональность и импульсный характер.

Таким образом, при всех имеющихся ограничениях петрогеохимические методы дают хорошие результаты при изучении истории развития докембрийских комплексов.

Авторы отдадут дань памяти своему постоянному соавтору Е. В. Мартынову, отвечавшему за математическое обеспечение изложенных выше методов.

Литература

Добрецов Н. Л., Верниковский В. А., Карякин Ю. В., Кораго Е. А., Симонов В. А. Мезозойско-кайнозойский вулканизм и этапы геодинамической эволюции Центральной и Восточной Арктики // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 8. С. 1126–1144.

Козлов Н. Е. Вещественный состав метаморфических комплексов высокобарных гранулитовых поясов и проблема формирования их протолитов (на примере Лапландских гранулитов): Автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук. СПб., 1995. 36 с.

Козлов Н. Е., Мартынов Е. В., Иванов А. А. Черты петрогеохимических различий основных пород энсиалических и энсиматических комплексов (сравнительный анализ фанерозоя и докембрия) // Геохимия. 1999. № 6. С. 582–588.

Козлов Н. Е., Мартынов Е. В., Сорохтин Н. О., Марчук Т. С. Эволюция вещественного состава ме-

табазитов раннего докембрия Кольского региона // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 304–313.

Козлов Н. Е., Мартынов Е. В., Сорохтин Н. О., Марчук Т. С. Петрогеохимические методы реконструкции геодинамических обстановок формирования раннедокембрийских комплексов и их ограничения // Геодинамика раннего докембрия: сходство и различия с фанерозоем: Мат-лы науч. конф. и путеводитель экскурсий. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 117–120.

Sorokhtin N. O., Kozlov N. E., Glaznev V. N., Martynov E. V. A study in Earth's geological evolution (the Baltic Shield). Wiley, 2020. 588 p.

Kozlov N. E., Sorokhtin N. O., Martynov E. V. Geodynamic evolution and metallogeny of Archaean structural and compositional complexes in the north-western Russian Arctic // Minerals. 2018. Vol. 8(12). P. 573. doi: 10.3390/min8120573

References

Dobretsov N. L., Vernikovskiy V. A., Simonov V. A., Karyakin Y. V., Korago E. A. Mesozoic-Cenozoic volcanism and geodynamic events in the Central and Eastern Arctic. *Russ. Geol. Geophys.* 2013;54(8):874–887.

Kozlov N. E. Material composition of metamorphic complexes of high-pressure granulite belts and the problem of their protoliths formation (on the example of Lapland granulites): Summary of DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. St. Petersburg; 1995. 36 p. (In Russ.)

Kozlov N. E., Martynov E. V., Ivanov A. A. Features of petrogeochemical differences in basic rocks of ensialic and ensiamatic complexes: Comparative analysis of the Phanerozoic and Precambrian. *Geochem. Intern.* 1999;37(6):512–518.

Kozlov N. E., Martynov E. V., Sorokhtin N. O., Marchuk T. S. Evolution of the material composition of metabasites in the Early Precambrian in the Kola region. *Vestnik MSTU = Vestnik of MSTU.* 2014;17(2):304–313. (In Russ.)

Kozlov N. E., Martynov E. V., Sorokhtin N. O., Marchuk T. S. Petrogeochemical methods of reconstruction of geodynamic formation settings of the Early Precambrian complexes and their constraints. *Geodinamika rannego dokembriya: skhodstvo i razlichiya s fanerozoem: Mat-ly nauch. konf. i putevoditel' ekkursii = Geodynamics in the Early Precambrian: Similar and distinctive features with the Phanerozoic. Proceedings of the sci. conf. and excursion guidebook.* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2017. P. 117–120. (In Russ.)

Kozlov N. E., Sorokhtin N. O., Martynov E. V. Geodynamic evolution and metallogeny of Archaean structural and compositional complexes in the north-western Russian Arctic. *Minerals.* 2018;8(12):573. doi: 10.3390/min8120573

Sorokhtin N. O., Kozlov N. E., Glaznev V. N., Martynov E. V. A study in Earth's geological evolution (the Baltic Shield). Wiley; 2020. 588 p.

*Поступила в редакцию / received: 19.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Козлов Николай Евгеньевич

д-р геол.-мин. наук, профессор, директор
ГИ КНЦ РАН

e-mail: kozlov.n.e@yandex.ru

Сорохтин Николай Олегович

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник
лаборатории геодинамики, георесурсов, георисков
и геоэкологии

e-mail: nsorokhtin@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Kozlov, Nikolay

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Director of the Geological
Institute KSC RAS

Sorokhtin, Nikolay

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Laboratory for
Geodynamics, Georesources, Georisks, and Geoecology