

УДК 55 (470.21)

Геологическое строение района Устойярви (северо-западная часть Арктической зоны РФ)

Н. Е. Козлов*, Н. О. Сорохтин, Н. Е. Козлова, Е. В. Мартынов

*Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;

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

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
10.12.2021;

получена
после доработки
21.02.2022

Ключевые слова:

геодинамическая
эволюция,
зеленокаменные пояса,
архей,
коматииты,
геохимия,
металлогения,
Арктическая зона РФ,
Колмозеро-Воронья,
Ура-Губа

В статье приведены данные по геологии и вещественному составу пород района Устойярви (северо-западная часть Арктической зоны Российской Федерации). На основе изучения и математического сравнения (анализа оценки меры близости/отличия) состава пород этого района, которые ранее были отнесены к Устойярвинской структуре (Устойярвинскому зеленокаменному поясу), с высокой долей вероятности сделан вывод об их сходстве с породами Урагубской части пояса Колмозеро-Воронья, и что они являются его продолжением. Кроме того показано, что с запада на восток структурно-вещественные комплексы соседнего (Суормусского) блока постепенно насыщаются тектоническими клиньями пород Устойярвинского зеленокаменного пояса, что указывает на увеличение степени коллизионного взаимодействия различных по генезису породных ассоциаций. Оценены P-T параметры образования коматиитов зеленокаменных поясов: Колмозеро-Воронья, Ура-Губы, Устойярви и района Западной Лицы. Установлено, что коматииты зеленокаменного пояса Устойярви образовались при давлении около 5 ГПа, района Ура-Губы – около 4,5 ГПа, Колмозеро-Воронья – около 2 ГПа. Таким образом, коматииты зеленокаменного пояса Устойярви являются более высокobarическими образованиями.

Для цитирования

Козлов Н. Е. и др. Геологическое строение района Устойярви (северо-западная часть Арктической зоны РФ). Вестник МГТУ. 2022. Т. 25, № 1. С. 12–26. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-12-26>.

Geological structure of the Ustoyarvi region (North-Western part of the Russian Arctic)

Nikolay E. Kozlov*, Nikolay O. Sorokhtin, Natalia E. Kozlova, Eugeny V. Martynov

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;

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

Article info

Received
10.12.2021;

received
in revised form
21.02.2022

Key words:

geodynamic evolution,
greenstone belts,
Archaean,
komatiites,
geochemistry,
metallogeny,
Arctic zone of RF,
Kolmozero-Voronya,
Ura-Guba

Abstract

The paper presents data on geology and composition of rocks from the Ustoyarvi region (the North-Western Arctic zone of Russian Federation). Their compositional analysis (including mathematical evaluation of the similarity/difference measure) provided much reliable conclusion that the rocks from this area, which are presumably attributed to the Ustoyarvi structure (Ustoyarvinsky Greenstone Belt) were similar to those from the Ura-Guba area in the Kolmozero-Voronya Belt and continued it. In addition, it has been shown that from west to east lithotectonic units in the adjacent (Suormussky) Block become gradually impregnated with tectonic wedges of rocks of the Ustoyarvi Greenstone Belt. It indicates increasing collisional interaction between rock associations with a varied genesis. P-T formation parameters have been specified for komatiites from greenstone belts, i. e. the Kolmozero-Voronya, Ura-Guba, Ustoyarvi and Western Litsa area. It has been defined that komatiites of the Ustoyarvi Greenstone Belt were formed under pressure of about 5 hPa, komatiites of the Ura-Guba area – about 4.5 hPa, komatiites of the Kolmozero-Voronya – about 2 hPa. Thus, komatiites of the Ustoyarvi Greenstone Belt are more high-pressure formations.

For citation

Kozlov, N. E. et al. 2022. Geological structure of the Ustoyarvi region (North-Western part of the Russian Arctic). *Vestnik of MSTU*, 25(1), pp. 12–26. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-12-26>.

Введение

Район оз. Устойярви изучен геологическими и поисковыми работами крайне неравномерно и с разной степенью детальности (*Отчет...*, 1999). Главной особенностью площади, значительно затрудняющей проведение работ, является практически полное отсутствие кондиционных геологических карт. Геологической съемкой масштаба 1 : 50 000 охвачено около 50–60 % площади. Проведенным ранее съемкам более полувека. Они не сопровождалась достаточным объемом геофизических, геохимических, опробовательных работ, а иногда велись без топографической основы. Так, съемка масштаба 1 : 25 000 проводилась в 1951 г. (Т. Л. Гольдбурт) по топоосновам, снятым с довоенных финских карт, в результате чего расхождения в привязках обнажений достигают 200–1 000 м. В 1998–2000 гг. непосредственно на этой территории проводилась детальная геологическая съемка масштаба 1 : 50 000 Л. В. Вороняевой (1999). В результате последних работ в пределах района Устойярви была выделена Устойярвинская структура (Устойярвинский зеленокаменный пояс), предположительно относящаяся к зеленокаменному поясу Ура-Губа – Колмозеро-Воронья, расположенная в его северо-западном продолжении (*Отчет...*, 1999; *Вороняева и др.*, 2008). В ходе работ, проведенных авторами, исследовалась территория хребта Мустатунтури и его южного обрамления вдоль старой немецкой дороги между губами Печенгской и Титовка (примерно 1,5–2 км в обе стороны от дороги) и в районе Западной Лицы (в 15 км к югу от ЗАТО Заозерск). Устойярвинская структура находится в первом из перечисленных районов (рис. 1). Ее протяженность около 14 км, ширина от 1 км до 3 км. Район работ расположен на продолжении структурной зоны между Мурманским доменом и Центрально-Кольским сегментом Кольско-Норвежского блока, к которой приурочены Колмозеро-Вороньинский и Урагубский зеленокаменные пояса. Зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья интересен находками коматитов на его территории, выявленных относительно недавно – в конце 70-х годов прошлого века (*Вревский*, 1980). Они были также обнаружены в пределах западной части позднеархейской зоны Колмозеро-Воронья (*Вревский*, 1989; *Борисова и др.*, 1991; *Смолякин*, 1992). Многочисленные выходы коматитов также были обнаружены В. В. Борисовой в районе среднего течения р. Ура. В последующем коматииты найдены в пределах бассейна рек Западная Лица и Титовка (в их среднем и верхнем течении) и на водоразделе р. Титовка – губа Печенга – губа Малая Волоковая, что позволило выделить Урагубско-Титовскую структуру (*Борисова и др.*, 1999). Она совместно со структурой Колмозеро-Воронья была объединена в Северо-Кольский зеленокаменный пояс позднеархейского возраста (*Смолякин и др.*, 2000). Устойярвинская структура находится на продолжении этого пояса и содержит многочисленные тела ультрабазитов, полностью превращенные в серпентин-хлоритовые сланцы.

Целью работы являлось изучение геологии, петрографии и петрохимии недостаточно изученных породных ассоциаций района Устойярви с тем, чтобы дополнительно аргументировать возможность отнесения Устойярвинской структуры (Устойярвинского зеленокаменного пояса) к зеленокаменному поясу Ура-Губа – Колмозеро-Воронья.

Материалы и методы

Обсуждаемый в настоящей работе материал был собран в ходе полевых исследований. Для получения представительной информации отобрано и изучено около 50 шлифов, фотографии которых были сделаны на поляризационном микроскопе AXIOPLAN, несколько аншлифов; создана база данных химических анализов пород Мурманского домена, зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья и его фрагментов – Устойярвинской и Ура-Губской структуры, Кольской серии и Суормусского блока, а также ксенолитов Мурманского домена в районах Йоканьги, Гремихи, Ура-Губы, Териберки, Устойярви. Эта база данных включает около 450 полных силикатных химических анализов пород.

Для изучения вещественного состава Устойярвинского зеленокаменного пояса и сравнения его с зеленокаменным поясом Колмозеро-Воронья, его Урагубской частью, Мурманским доменом, породами кольской серии (Лиинахамарский, Луостаринский и Суормусский блоки) была использована методика, разработанная Е. В. Мартыновым (*Козлов и др.*, 1999), включающая метод поиска трендов частично упорядоченных совокупностей случайных величин и анализ оценки меры близости (отличия) составов пород.

Геологическое строение района Устойярви

Данный район был ранее детально изучен Л. В. Вороняевой (*Отчет...*, 1999; *Пожиленко и др.*, 2002). В его пределах обнажены гнейсы кольской серии, относимые к Суормусскому блоку Центрально-Кольского сегмента Кольско-Норвежского блока, граниты и гранитогнейсы Мурманского домена с многочисленными меланократовыми включениями, а также линейный зеленокаменный пояс, коррелируемый с породами зоны Колмозеро-Воронья (*Магматические...*, 1986; *Отчет...*, 1999; *Вороняева и др.*, 2008).

Суормусский блок сложен биотитовыми, гранат-биотитовыми, силлиманит-гранат-биотитовыми гнейсами, с прослоями амфиболитов и магнетитовых кварцитов. Амфиболиты чаще образуют самостоятельные прослои, но встречаются также и в джеспилитовой ассоциации вместе с ультрабазитами (линзовидные тела, цепочкой тянущиеся на километры согласно с общим расланцеванием) и железистыми кварцитами, расположенными на границе ультрабазитов и гранат-биотитовых гнейсов, и отделяющимися от последних

часто с турмалином. Степень хлоритизации пород тут меньше, чем в Устоярвинском зеленокаменном поясе. По мере приближения к нему отмечается увеличение степени хлоритизации.



Рис. 2. Граница интенсивно рассланцованных и более массивных амфиболовых сланцев на контакте Устоярвинского зеленокаменного пояса с породами кольской серии
Fig. 2. Boundary between intensely sheared and more massive amphibole schists on the contact of the Ustoyarvi Greenstone Belt with the Kola series rocks

На севере, в районе хребта Мустатунтури, Устоярвинский зеленокаменный пояс граничит с породами неоархея Мурманского домена. Граница тектоническая, через зону бластомилонитов, шириной 100–500 м (рис. 3). В этой зоне наблюдаются биотитовые гнейсы с большим количеством кварцевых жилок разной мощности, смятых в складки, оси поверхностей которых параллельны сланцеватости пород. Среди биотитовых гнейсов присутствуют тонкополосчатые, интенсивно рассланцованные сланцы с сульфидами. В сланцах встречаются многочисленные будинированные жилы пегматитов и мясо-красных микроклиновых гранитов.



Рис. 3. Зона бластомилонитов на контакте Устоярвинского пояса с гранитогнейсами Мурманского домена, микроклиновые и кварцевые жилы
Fig. 3. The zone of blastomylonites on the contact between the Ustoyarvi Belt and granite-gneisses of the Murmansk domain, microcline and quartz veins

В породах Мурманского домена вблизи контакта с породными ассоциациями Устьярвинского зеленокаменного пояса наблюдается зона сплошных бластомилонитов по гранитогнейсам. Метаморфические комплексы Мурманского домена представлены гранитогнейсами и гнейсами по гранитоидам с прослоями амфиболитов. Породы микроклинизированы, степень микроклинизации увеличивается в северо-восточном направлении. Самыми древними в породах Мурманского домена являются мелкозернистые гнейсы – тоналито-гнейсы и метадиориты. Они образуют реликтовые участки среди гранитов с различным содержанием микроклина (рис. 4). В них наблюдаются тонкие прожилки плагиогранитного состава и пегматиты. Наиболее ранние прожилки имеют белый цвет и содержат мало микроклина. В отдельных обнажениях встречаются мелкие складки.



Рис. 4. Мелкозернистые тоналито-гнейсы Мурманского домена
Fig. 4. Fine-grained tonalite-gneisses of the Murmansk domain

Устьярвинский зеленокаменный пояс прослеживается на 25 км между губами Печенга и Титовка. Он имеет сложную, но в целом отчетливо выраженную поясовую конфигурацию и непрерывно прослеживается в северо-западном направлении от р. Титовка до губы Амбарная на 25 км при ширине 0,25–2 км. Супракрустальные образования структуры сложены титовско-баренцевоморской толщей, в разрезе которой преобладают амфиболиты. Широко развиты также биотитовые, амфибол-биотитовые плагиогнейсы, метаультрабазиты. В подчиненном количестве встречаются магнетитовые кварциты, гранатовые и гранат-биотитовые гнейсы. Внутреннее строение шовной зоны контролируется протяженными сдвиговыми нарушениями. Горизонтальные дислокации подчеркиваются мощными зонами катаклизитов, милонитов, особенно вдоль тектонизированных контактов гранитоидов и амфиболитов (Вороняева, 2003).

Породы пояса интенсивно тектонизированы, в центральной части наблюдаются вытянутые в северо-западном направлении линзы преимущественно хлоритовых сланцев и гнейсов. Границы между этими линзами тектонические. Сланцы тектонизированы и смяты в складки с погружением шарниров по азимуту 350° под средними углами. Отмечены микросдвиговые зоны параллельно осевым поверхностям микроскладок. Первичных вулканических структур тут не наблюдается. В некоторых гнейсовых линзах встречаются прослои амфиболитов, иногда с гранатом, причем гранат концентрируется на границе с гнейсами – вплоть до гранатитов.

В породах Устьярвинского зеленокаменного пояса интенсивно проявлена складчатость. Характер складок был закартирован в его юго-восточном окончании, вблизи контакта с породами Мурманского домена (участок Туманный, рис. 5). Складки асимметричные, S- и Z-образные с преобладанием S-образных. Шарниры складок под средними углами погружаются по азимуту 350°. Осевые плоскости круто падают по азимуту 85°. На границе Мурманского домена и Устьярвинского пояса наблюдается зона бластомилонитов.

В пределах пояса широко развиты дайки, различающиеся по составу и степени измененности. Они секут все комплексы (рис. 6) и имеют преимущественно северо-восточное простирание, но нигде не пересекают тектоническую границу между Устьярвинским зеленокаменным поясом и Мурманским доменом. В пределах пояса встречены дайки долеритов, в которых клинопироксен нацело замещен амфиболом (это практически амфиболиты), но видна реликтовая офитовая структура, иногда дайки изменены полностью. Встречаются

также дайки долеритов, в которых клинопироксен почти не изменен, наблюдается лишь тонкая кайма амфиболита вокруг него. Кроме того, нами описаны дайки оливиновых микроноритов и лампрофиров (спессартитов) с амфиболом (керсутит), авгитом, плагиоклазом, калиевым полевым шпатом, титанитом и апатитом.



Рис. 5. Схема геологического строения детального участка Туманный
Fig. 5. Geological scheme of the Tumanny detailed area



Рис. 6. Долеритовые дайки северо-восточного простирания
Fig. 6. Dolerite dykes of the north-eastern strike

В районе Западной Лицы, на продолжении Урагубского комплекса, наблюдались хорошо сохранившиеся породы коматиит-базальтовой ассоциации: брекчиевидные лавы, метакоматииты с крупными оливинами. Брекчиевидные лавы представлены породой с угловатыми, вытянутыми по сланцеватости обломками, сцементированными амфибол-хлоритовыми сланцами (рис. 7). В некоторых обнажениях наблюдается чередование потоков с брекчиевидной структурой, потоков массивных и содержащих крупные выделения оливина (рис. 8). Наблюдаются реликты подушечной структуры (рис. 9).



Рис. 7. Брекчиевидные лавы
Fig. 7. Brecciated lavas



Рис. 8. Чередование потоков массивных и содержащих крупные выделения оливина
Fig. 8. Alternating of massive flows and flows with major olivine segregations



Рис. 9. Реликты подушечной структуры
Fig. 9. Relics of pillow structures

Гнейсы в этом районе преимущественно биотитовые, местами массивные, местами тонкополосчатые, насыщенные тонкими прослоями гранитоидного материала. Более массивные участки имеют линзовидную форму и облекаются полосчатыми гнейсами (рис. 10*а, б*). Наблюдается несколько генераций гранитоидного материала: тонкие прожилки, более грубозернистый материал, параллельный полосчатости и секущие пегматитовые жилки, расположенные по срывам (рис. 11).



а



б

Рис. 10. Разновидности гнейсов: *а* – линзовидный участок массивных гнейсов, облегаемый зоной расщепления. В массивном гнейсе наблюдаются складки, в которые смяты тонкие гранитоидные прожилки; *б* – разлинзованные прослой гранитов и пегматитов
Fig. 10. Varieties of gneisses: *а* – lens-like area of massive gneisses enveloped in a schistosity zone. Massive gneiss shows folds, where fine granitoid veinlets are folded; *б* – lensed interlayers of granites and pegmatites



Рис. 11. Генерации гранитного материала: тонкие прожилки, более грубозернистый материал, параллельный полосчатости и секущие пегматитовые жилки, расположенные по срывам
Fig. 11. Generations of granite material: fine veinlets, more coarse-grained material parallel to banding and intersecting pegmatite veins along shears

Петрохимическая характеристика пород Устоярвинского зеленокаменного пояса

По результатам геологических и петрографических исследований пород из разных блоков в Устоярвинской структуре были выделены четыре крупные геолого-петрографические группы: кислые породы (гнейсы), основные породы, залегающие в разрезе согласно, метагранитоиды и дайки. Дайки различаются по степени измененности и по минеральному составу и, возможно, принадлежат к различным возрастным группам. Сопоставление проводилось по всей породной ассоциации как Устоярвинского, Урагубского и Колмозеро-Вороньинского зеленокаменных поясов, так и контактирующих с ними пород Мурманского домена и Центрально-Кольского сегмента Кольско-Норвежского домена (Суормусского, Лиинахамарского и Луостаринского блоков).

Все основные и кислые породы этих структур были разделены по методу А. А. Предовского (1980) на группы первично осадочных и магматических пород. Среди пород кислого состава всех этих структур метаморфизованные вулканические разности выявлены только среди пород Мурманского домена. Породы кислого состава остальных районов относятся к метаосадочным образованиям (метаграувакки, метааркозы, метаполимикты и гидрослюдистые метапелиты). Основные породы реконструируются как метамагматиты.

Метод поиска трендов частично упорядоченных совокупностей случайных величин и анализ оценки меры близости (отличия) составов (Козлов и др., 1999) пород показал, что степень близости (отличия) оценивается через медиану значений мер близости (отличия) химических составов отдельных пород Устоярвинского зеленокаменного пояса до вышеуказанных объектов, представленных совокупностями фигуративных точек химического состава.

Степень близости (отличия) оценивалась через медиану значений мер близости (отличия) химических составов отдельных пород Устоярвинского зеленокаменного пояса до вышеуказанных объектов, представленных совокупностями фигуративных точек химического состава. Для оценки степени значимости отличия составов можно воспользоваться значением статистики Пури – Сена – Тамуры.

С целью повышения надежности результатов сопоставлений и минимизирования возможного влияния на них метаморфических изменений для решения поставленной задачи были выбраны данные о содержании в породах SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , $\sum\text{FeO}$, MgO , MnO , CaO , Na_2O и K_2O . Такие подвижные элементы, как CO_2 , H_2O , Cl , F и т. д., из рассмотрения были исключены. Далее суммы полных силикатных анализов пересчитаны на 100 %. Затем было исследовано, к какой из выборок пород метаморфиты Устоярвинского зеленокаменного пояса наиболее близки. Для сравнения выбраны породы кислого состава: Мурманского домена в районе Ура-Губы и Териберки, Урагубской части зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья и породы Центрально-Кольского сегмента (Лиинахамарский и Луостаринский блоки). Сравнение состава амфиболитов и ассоциации пород кислого и основного состава из этих районов по аналогичному методу результатов не дало. Степень близости пород Устоярвинского зеленокаменного пояса к сравниваемым объектам различается не значимо, возможно, в связи с непредставительностью выборок.

Важно отметить, что в расчет не брались районы Мурманского домена и Центрально-Кольского сегмента, близкие к Устоярвинскому зеленокаменному поясу, так как в них могли быть опробованы породы его тектонических клиньев. Значения меры близости (отличия) составов пород вышеперечисленных районов к составам метаморфитов Устоярвинского зеленокаменного пояса и значимость отличий этих значений приведены в табл. 1. Анализ полученных данных показал, что при выбранном уровне значимости 0,05 по вещественному составу кислые породы Устоярвинского зеленокаменного пояса наиболее близки к породам кислого состава Урагубской структуры. Причем такой вывод можно сделать как при сравнении со всеми структурами в отдельности, так и с укрупненными группами, что повышает представительность данных и надежность выводов. Таким образом, с 95%-й долей вероятности на основе наших данных можно утверждать, что породы Устоярвинского зеленокаменного пояса сходны с породами зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья, т. е. являются его частью. Заметим, что в выборку пород кольской серии при проведении данных сопоставлений мы не включали данные о составе пород Суормусского блока, поскольку четкой границы между его комплексами и породами Устоярвинского зеленокаменного пояса, как показано выше, установить невозможно.

Таблица 1. Оценка меры близости (отличия) вещественного состава кислых пород Устоярвинского зеленокаменного пояса из Урагубской части зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья, Лиинахамарского блока, Луостаринского блока, Мурманского домена в районе Терибержки, Мурманского домена в районе Ура-Губы (а), а также Устоярвинского зеленокаменного пояса из Урагубской части зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья, совокупности пород кислого состава кольской серии и совокупности пород Мурманского домена (б)

Table 1. Estimation of the compositional proximity (difference) of acid rocks in the Ustoyarvi Greenstone Belt from the Ura-Guba area of the Kolmozero-Voronya Greenstone Belt, Liinakhamari Block, Luostari Block, Murmansk domain near Teriberka, Murmansk domain near Ura-Guba (a), as well as the Ustoyarvi Greenstone Belt from the Ura-Guba area of the Kolmozero-Voronya Greenstone Belt, association of acid rocks of the Kola series and association of rocks in the Murmansk domain (b)

а

Устоярви	Ug	LB	LU	MDT	MDU
Ug	1,48*	0	0	0	0
LB	> 3,86	2	0	0	0
LU	> 3,86	> 3,86	2,6	0	0
MDT	> 3,86	> 3,86	> 3,86	2,7	0
MDU	> 3,86	> 3,86	> 3,86	> 3,86	3,25

б

Устоярви	Ug	LB+LU	MDT+MDU
Ug	1,37	0	0
LB+LU	6,4	2	0
MDT+MDU	7,58	2	2,6

Примечание. Условные обозначения: US – Устоярвинский зеленокаменный пояс; Ug – Урагубская часть зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья; LB – Лиинахамарский блок; LU – Луостаринский блок; MDT – Мурманский домен в районе Терибержки; MDU – Мурманский домен в районе Ура-Губы; * – цифры в таблице, выделенные жирным шрифтом, показывают степень близости (отличия) вещественного состава пород соответствующего района к породам Устоярвинского зеленокаменного пояса (чем больше значение этой величины, тем выше степень отличия составов); цифры, расположенные в таблице ниже выделенных, показывают значение коэффициента Пури – Сена – Тамуры, который определяет, насколько значимо это отличие (оно значимо, если коэффициент больше 3,86).

Если принять такую точку зрения, интересным представляется вопрос о характере латеральной изменчивости состава пород и чертах эволюции данной структуры. Для решения этой задачи были найдены тренды относительно частично упорядоченной совокупности случайных величин, характеризующие изменение вещественного состава от образований зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья, через Ура-Губу к Устоярви (табл. 2). Отчетливо видно, что в этом направлении в метабазитах возрастает содержание MgO и $\sum\text{FeO}$, что может свидетельствовать о более высокотемпературном режиме их формирования. Обращает на себя внимание сходство трендов изменения вещественного состава кислых пород (F1) и метабазитов (F2): в этом направлении отмечается увеличение содержания SiO₂, $\sum\text{FeO}$, MgO и обеднение Al₂O₃, MnO, CaO, Na₂O, что позволяет предполагать связь вещества метасадочных пород с метавулканитами при формировании комплексов пород данной структуры.

Таблица 2. Тренды изменения вещественного состава от образований зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья, через Ура-Губу к Устярвинскому зеленокаменному поясу для пород кислого состава (F1) и метабазитов (F2). Коэффициенты при компонентах химического состава означают, насколько изменилось содержание соответствующего элемента в породе

Table 2. Trends in compositional changes from formations of the Kolmozero-Voronya Greenstone Belt through Ura-Guba to the Ustoyarvi Greenstone Belt for acid rocks (F1) and metabasites (F2). Coefficients for components of the chemical composition indicate changes in amounts of certain elements in the rock

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	∑FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
1	0,11	0,02	-0,32	0,07	-0,41	0,6	-0,27	-0,27	0,46
2	0,34	-0,13	-0,28	0,20	-0,30	0,70	-0,39	-0,07	-0,08

Метакоматииты отмечаются и в Ура-Губе, и в районе Устярви, и в самой зоне Колмозеро-Воронья. При их сопоставлении были использованы химические анализы тех пород зоны Колмозеро-Воронья, которые все исследователи относят именно к коматиитам (из расчетов были исключены химанализы пород г. Лшей, правильность отнесения которых к коматиитовой ассоциации как эффузивным образованиям вызывает сомнения (Вревский, 1980; 1989; Смолькин, 1992)). Особо отметим, что результаты, полученные при изучении коматиитов, рассматриваются авторами как предварительные. Без сомнения, для получения более полной картины необходимо детальное исследование также данных по геохимии редких и редкоземельных элементов. К сожалению, такая информация по отдельным частям этой крайне интересной шовной зоны на сегодня отсутствует. Получение и анализ таких данных представляется авторам задачей будущего. В связи с этим в работе использовалась лишь информация по содержанию петрогенных элементов, доступная для всех участков этого крайне интересного геологического объекта.

Для установленных коматиитов зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья, Ура-Губы и хлоритовых сланцев Устярвинской структуры (предположительно коматиитов) на диаграмме Al₂O₃–CaO (рис. 12, а) установлено следующее значение отношения CaO / Al₂O₃: большинство точек попадает в область, где CaO / Al₂O₃ < 1. Часть точек коматиитов попадает в область диаграммы, где значение отношения CaO / Al₂O₃ > 1. Разброс отношения CaO / Al₂O₃ имеет различные причины: для субвулканических тел он обусловлен подвижностью Al₂O₃ и CaO при хлоритизации и серпентинизации, а для вулканических образований – суммарным эффектом процессов карбонатизации, хлоритизации и амфиболитизации. На диаграмме Al₂O₃–TiO₂ (рис. 12, б) сравнивались метакоматииты различных структур. Большая часть метакоматиитов Ура-Губы и Колмозеро-Воронья располагается между линиями с отношением Al₂O₃ / TiO₂, равным 10 и 20, образуя поле Al-деплементированных пород.

На тройной классификационной диаграмме Л. Дженсена (рис. 13), скорректированной П. Ригвудом из (Смолькин и др., 2000), в пределах коматиит-базальтовой ассоциации зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья, районов Ура-Губы, Западной Лицы и Устярвинского зеленокаменного пояса выделяются собственно коматииты, коматиитовые базальты, базальты толеитовой и известково-щелочной серий, а также высокожелезистые толеитовые базальты.

Расположение коматиитов Устярвинского зеленокаменного пояса близко к коматиитам зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья, они также попадают в область между Al₂O₃ / TiO₂ = 10 и 20, единичные анализы располагаются выше отношения Al₂O₃ / TiO₂ = 10. Из диаграммы MgO – SiO₂ (рис. 12, в) видно, что породы Урагубского и Устярвинского зеленокаменных поясов сходны по магнезиальности (образования зеленокаменного Устярви чуть более насыщены MgO). О магнезиальности коматиитов зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья однозначно говорить сложно из-за большого разброса значений.

На рис. 13 большая часть базальтов вышеперечисленных районов попадает в поле высокожелезистых толеитовых базальтов, единичные анализы пород зеленокаменных поясов Колмозеро-Воронья и Устярви попадают в поле коматиитовых базальтов. Коматииты располагаются в поле коматиитовых базальтов и коматиитов, незначительная часть их попадает в поле базальтов. Общий эволюционный тренд коматиит-базальтовой серии зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья и его Устярвинского и Урагубского фрагментов направлен от перидотитовых коматиитов к высокожелезистым базальтам.

Чтобы определить P-T параметры образования коматиитов, химические анализы пород зеленокаменных поясов Колмозеро-Воронья, Ура-Губы, Устярви и района Западной Лицы были пересчитаны по методу SIPWD с использованием специально разработанной для этого диаграммы М. И. Дубровского (рис. 14) (Дубровский, 2012). Установлено, что коматииты Устярвинского зеленокаменного пояса кристаллизовались при давлении около 5 ГПа, района Ура-Губы – около 4,5 ГПа, зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья – около 2 ГПа. С учетом этих данных и интерпретацией положения точек состава пород на данной диаграмме можно предположить, что коматииты Устярвинского зеленокаменного пояса являются также и более высокотемпературными образованиями, что хорошо коррелируется с данными, полученными для метабазальтов. При этом данный вывод не согласуется с выводами, сделанными предыдущими исследователями (Смолькин и др., 2000). С учетом такого противоречия, а также малого количества анализов по коматиитам, наметившуюся для них тенденцию авторы рассматривают как предварительный результат. Как было отмечено выше,

для получения более надежных данных необходимо также изучение распределения в породах редких и редкоземельных элементов.

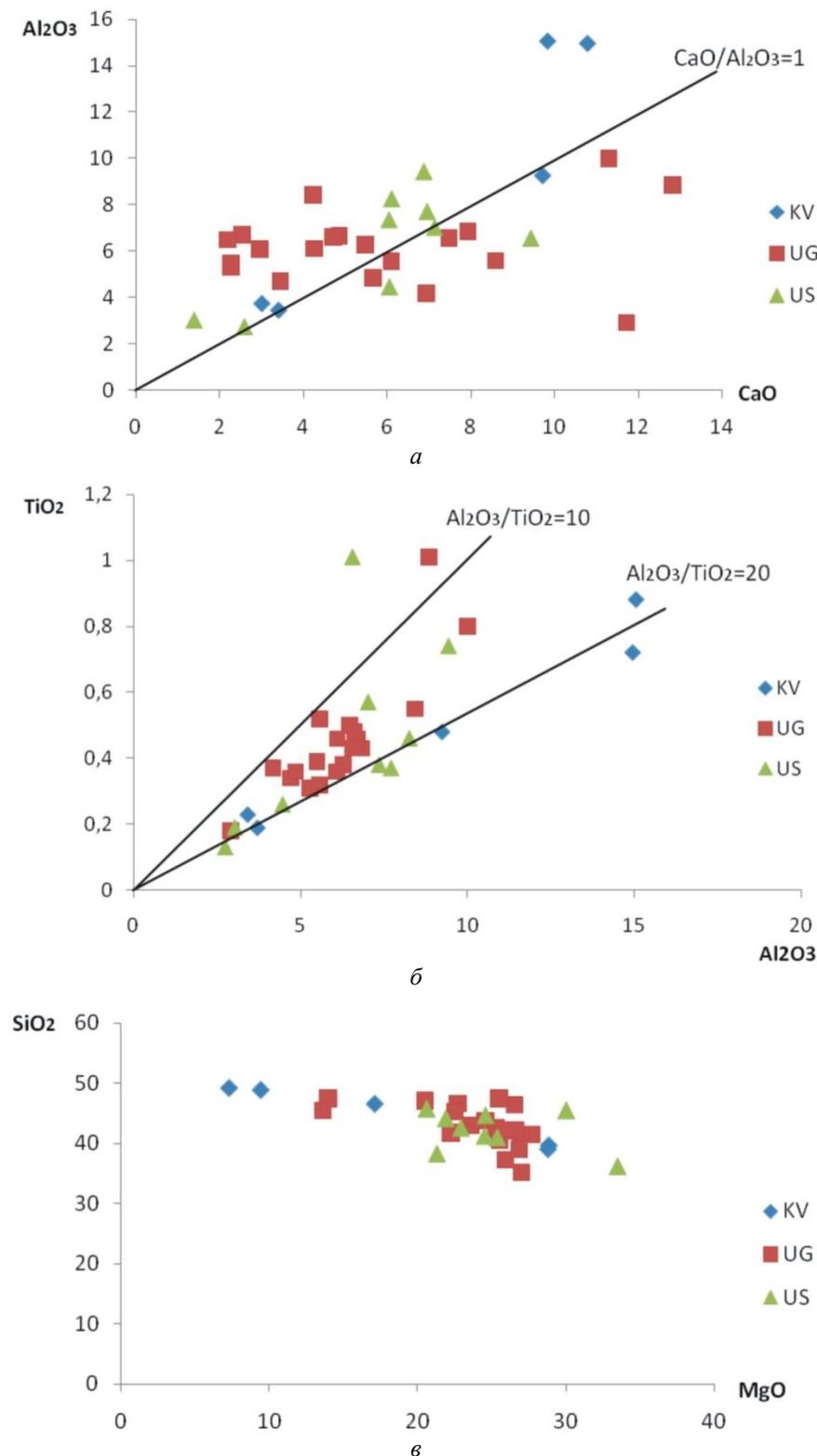


Рис. 12. Соотношение CaO – Al₂O₃ (а), Al₂O₃ – TiO₂ (б) и MgO – SiO₂ (е) в коматитах зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья (KV), его Урагубской части (UG) и Устоярвинского зеленокаменного пояса – р-н Западной Лицы (US)
Fig. 12. Ratio of CaO – Al₂O₃ (a), Al₂O₃ – TiO₂ (б), and MgO – SiO₂ (е) in komatiites of the Kolmzero-Voronya Greenstone Belt (KV), its Ura-Guba area (UG) and the Greenstone Belt of the Ustoyarvi-Western Litsa area (US)

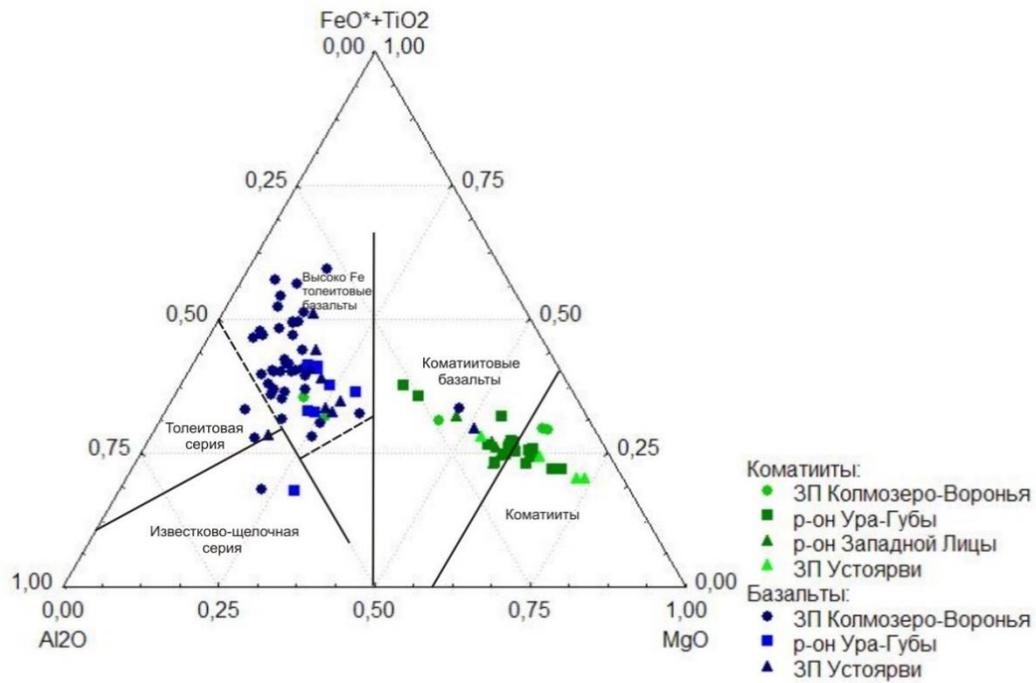


Рис. 13. Соотношение главных компонентов коматиитов и базальтов зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья, районов Ура-Губы и Западной Лицы и зеленокаменного пояса Устоярви
 Fig. 13. Major components ratio for komatiites and basalts in the Kolmozero-Voronya Greenstone Belt, Ura-Guba area, Western Litsa area and Ustoyarvi Greenstone Belt

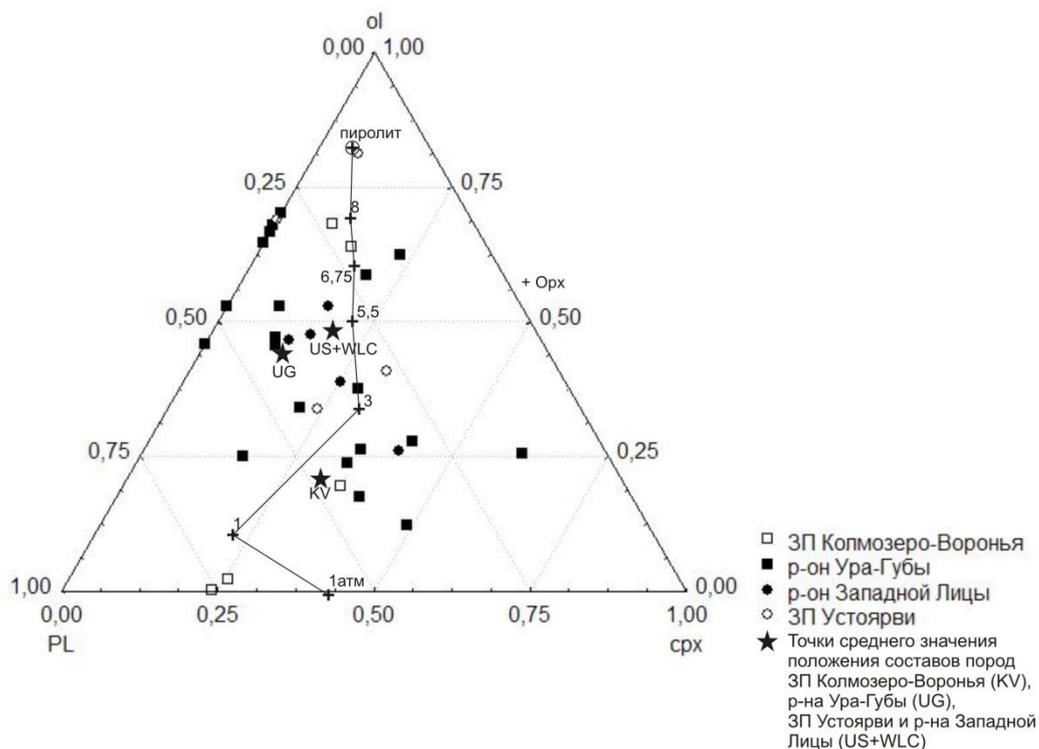


Рис. 14. Положение коматиитов на основании ol-cpx-pl тетраэдра ol-cpx-pl-орх как проекции из объема изоплетического тетраэдра fo-fa-di-hd-ab-an-en-fs (Дубровский, 2012)
 Fig. 14. Position of komatiites at the base ol-cpx-pl of tetrahedron ol-cpx-pl-orx as projections from volume of isopleth tetrahedron fo-fa-di-hd-ab-an-en-fs (Dubrovsky, 2012)

Заключение

Изучение состава пород с использованием методики, разработанной Е. В. Мартыновым (*Козлов и др., 1999*), включающей метод поиска трендов частично упорядоченных совокупностей случайных величин и анализ оценки меры близости (отличия) составов пород позволяет сделать вывод, что Устойярвинский зеленокаменный пояс является составной частью ранее выделявшегося пояса Ура-Губа – Колмозеро-Воронья. Данный вывод дополняется материалами о том, что с запада на восток породы Суормусского блока становятся все более насыщенными тектоническими клиньями пород Устойярвинского зеленокаменного пояса. Аналогичное исследование проводилось и для основных пород Мурманского домена, расположенных близко к структуре Устойярви. В работе Л. В. Вороняевой и В. И. Пожиленко (*Вороняева и др., 2008*) в пределах Мурманского домена установлено наличие прослоев пород основного состава, относящихся к Устойярвинскому зеленокаменному поясу. При геологическом изучении Мурманского домена, граничащего с поясом Устойярви, нами были выделены такие же прослои основных пород, но тенденции уменьшения их содержания при удалении от района Устойярви не установлено, они развиты локально. Оценены Р-Т параметры образования коматиитов зеленокаменных поясов: коматииты Устойярвинского зеленокаменного пояса – около 5 ГПа, района Ура-Губы – около 4,5 ГПа, зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья – около 2 ГПа. С учетом этих данных и интерпретацией положения точек состава пород на диаграмме М. И. Дубровского (*2012*) можно предположить, что коматииты Устойярвинского зеленокаменного пояса являются не только более высокобарическими, но и более высокотемпературными образованиями, что хорошо коррелируется с данными, полученными для метабазальтов. Данный вывод авторы рассматривают как предварительный.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Т. С. Марчук за работу по оформлению данной публикации.

Работа выполнена в рамках тем государственного задания № 0226-2019-0052 (№ FMEZ-2022-0025) и № 0128-2021-0004.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Борисова В. В., Борисов А. Е., Смолькин В. Ф. Новое проявление коматиитового вулканизма на Кольском полуострове // Доклады Академии наук СССР. 1991. Т. 316, № 1. С. 196–199.
- Борисова В. В., Борисов А. Е., Смолькин В. Ф., Реженева С. А. Генезис порфиробластических оливинов в коматиитах Кольского полуострова // Записки Всероссийского минералогического общества. 1999. Т. СХХVII, № 2. С. 63–71.
- Вороняева Л. В. Геологическое строение и золотоносность позднеархейской Устойярвинской гранит-зеленокаменной зоны, северо-запад Кольского полуострова // Руды и металлы. 2003. № 2. С. 51–62.
- Вороняева Л. В., Пожиленко В. И. Устойярви – фрагмент гранит-зеленокаменной области (западная часть Мурманского домена) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2008. № 5. С. 120–123.
- Вревский А. Б. Коматииты из раннедокембрийского пояса Полмос-Порос (Кольский полуостров) // Доклады Академии наук СССР. 1980. Т. 252. № 3. С. 1216–1219.
- Вревский А. Б. Петрология и геодинамические режимы развития архейской литосферы (на примере северо-восточной части Балтийского щита) / отв. ред. Д. В. Рундквист. М. : Наука, 1989. 143 с.
- Дубровский М. И. Условия генерации коматиитовых магм // Литосфера. 2012. № 2. С. 152–159.
- 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.
- Магматические и метаморфические комплексы пород Кольской сверхглубокой скважины : сб. ст. / гл. ред. Е. А. Козловский. Л. : Недра, Ленингр. отд-ние, 1986. 228 с.
- Отчет о проведении поисково-картировочных работ масштаба 1 : 25 000 на комплекс полезных ископаемых на побережье Баренцева моря (Варангер-фиорда) : в 5 кн. / Л. В. Вороняева, С. С. Караваев, Н. Я. Юрков [и др.]. Мончегорск, 1999. 5 кн.
- Пожиленко В. И., Гавриленко Б. В., Жиров Д. В., Жабин С. В. Геология рудных районов Мурманской области // Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2002. 359 с.
- Предовский А. А. Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия. Л. : Наука, 1980. 152 с.
- Смолькин В. Ф. Коматиитовый и пикритовый магматизм раннего докембрия Балтийского щита / отв. ред. А. Н. Виноградов. СПб. : Наука, 1992. 272 с.
- Смолькин В. Ф., Борисова В. В., Светлов С. А., Борисов А. Е. Позднеархейские коматииты Урагубско-Титовской структуры, северо-запад Кольского региона // Петрология. 2000. Т. 8, № 2. С. 199–224.

References

- Borisova, V. V., Borisov, A. E., Smolkin, V. F. 1991. A new manifestation of komatiite volcanism on the Kola Peninsula. *Doklady nauk SSSR*, 316(1), pp. 196–199. (In Russ.)
- Borisova, V. V., Borisov, A. E., Smolkin, V. F., Rezhnova, S. A. 1999. Genesis of porphyroblastic olivines in komatiites of the Kola Peninsula. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, CXXVII(2), pp. 63–71. (In Russ.)
- Voronyayeva, L. V. 2003. Geological structure and potential for gold of the Late Archaean Ustoyarvi Granite-Greenstone Area, the north-western Kola Peninsula. *Ores and Metals*, 2, pp. 51–62. (In Russ.)
- Voronyayeva, L. V., Pozhilenko, V. I. 2008. The Ustoyarvi – fragment of the granite-greenstone area (western part of the Murmansk domain). *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNtS*, 5, pp. 120–123. (In Russ.)
- Vrevsky, A. B. 1980. Komatiites from the Early Precambrian Polmos-Poros belt (the Kola Peninsula). *Doklady nauk SSSR*, 252(3), pp. 1216–1219. (In Russ.)
- Vrevsky, A. B. 1989. Petrology and geodynamic regimes of development of the Archean lithosphere (on the example of the northeastern part of the Baltic Shield). Ed. D. V. Rundkvist. Moscow. (In Russ.)
- Dubrovsky, M. I. 2012. Conditions of generation of komatiitic magmas. *Lithosphere*, 2, pp. 152–159. (In Russ.)
- Kozlov, N. E., Martynov, E. V., Ivanov, A. A. 1999. Features of petrogeochemical differences between main rocks of ensialic and ensiamatic complexes (comparative analysis of the Phanerozoic and Precambrian). *Geokhimiya*, 6, pp. 582–588. (In Russ.)
- Magmatic and metamorphic rock complexes from an ultra-deep well. 1986. Ed. E. A. Kozlovsky. Leningrad. (In Russ.)
- Report on implementation of prospecting and mapping works, scale 1 : 25 000, for complex minerals on the coast of the Barents Sea (the Varanger fjord). 1999. In 5 books. Eds. L. V. Voronyayeva, S. S. Karavaev, N. Ya. Yurkov et al. Monchegorsk. (In Russ.)
- Pozhilenko, V. I., Gavrilenko, B. V., Zhironov, D. V., Zhabin, S. V. 2002. Geology of ore areas in the Murmansk region. Apatity. (In Russ.)
- Predovsky, A. A. 1980. Reconstruction of conditions for sedimentation and volcanism in the Early Precambrian. Leningrad. (In Russ.)
- Smolkin, V. F. 1992. Komatiitic and picritic magmatism in the Baltic Shield in the Early Precambrian. Ed. A. N. Vinogradov. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Smolkin, V. F., Borisova, V. V., Svetlov, S. A., Borisov, A. E. 2000. Late Archaean komatiites of the Ura-Guba-Titovka structure, the north-western Kola region. *Petrologiya*, 8(2), pp. 199–224. (In Russ.)

Сведения об авторах

Козлов Николай Евгеньевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, д-р геол.-минерал. наук, профессор; e-mail: kozlov.n.e@yandex.ru

Nikolay E. Kozlov – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Dr Sci. (Geol. & Miner.), Professor; e-mail: kozlov.n.e@yandex.ru

Сорохтин Николай Олегович – Нахимовский пр., 36, Москва, Россия, 117997; Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, д-р геол.-минерал. наук, гл. науч. сотрудник; e-mail: nsorokhtin@mail.ru

Nikolay O. Sorokhtin – 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, Russia, 117997; Shirshov Institute of Oceanology RAS, Dr Sci. (Geol. & Miner.), Chief Researcher; e-mail: nsorokhtin@mail.ru

Козлова Наталия Евгеньевна – пенсионер, работала ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН

Natalia E. Kozlova – Retired Researcher, former work 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS

Мартынов Евгений Васильевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: mart@geoksc.apatity.ru

Eugeny V. Martynov – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geol. & Miner.), Senior Researcher; e-mail: mart@geoksc.apatity.ru