

Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр  
Российской академии наук»

# **ТРУДЫ**

## **КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

№ 10, 2020

Серия ГЕОЛОГИЯ ДОКЕМБРИЯ

Петрозаводск  
2020

Главный редактор  
А. Ф. ТИТОВ, член-корр. РАН, д. б. н., проф.

Редакционный совет

А. М. АСХАБОВ, академик РАН, д. г.-м. н., проф.; О. Н. БАХМЕТ (зам. главного редактора), член-корр. РАН, д. б. н.; А. В. ВОРОНИН, д. т. н., проф.; И. В. ДРОБЫШЕВ, доктор биологии (Швеция – Канада); Э. В. ИВАНТЕР, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; Х. ЙООСТЕН, доктор биологии, проф. (Германия); А. М. КРЫШЕНЬ, д. б. н.; Е. В. КУДРЯШОВА, д. флс. н., проф.; О. Л. КУЗНЕЦОВ, д. б. н.; Н. В. ЛУКИНА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; В. В. МАЗАЛОВ, д. ф.-м. н., проф.; Н. Н. НЕМОВА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; О. ОВАСКАЙНЕН, доктор математики, проф. (Финляндия); О. Н. ПУГАЧЕВ, академик РАН, д. б. н.; С. А. СУББОТИН, доктор биологии (США); Д. А. СУБЕТТО, д. г. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, член-корр. РАН, д. г. н., проф.; Т. Э. ХАНГ, доктор географии (Эстония); П. ХЁЛЬТТЯ, доктор геологии, проф. (Финляндия); К. ШАЕВСКИЙ, доктор математики, проф. (Польша); В. В. ЩИПЦОВ, д. г.-м. н., проф.

Редакционная коллегия серии «Геология докембрия»

Ю. Л. ВОЙТЕХОВСКИЙ, д. г.-м. н., проф.; О. И. ВОЛОДИЧЕВ, д. г.-м. н.; А. Б. ВРЕВСКИЙ, д. г.-м. н., проф.; В. В. КОВАЛЕВСКИЙ, д. г.-м. н.; В. С. КУЛИКОВ, д. г.-м. н.; Ю. А. МОРОЗОВ, член-корр. РАН, д. г.-м. н.; А. В. ПЕРВУНИНА (ответственный секретарь), к. г.-м. н.; А. М. ПЫСТИН, д. г.-м. н., проф.; А. В. САМСОНОВ, член-корр. РАН, д. г.-м. н.; С. А. СВЕТОВ (зам. отв. редактора), д. г.-м. н., проф.; А. И. СЛАБУНОВ, д. г.-м. н.; А. СОЭСОО, доктор геологии, проф. (Эстония); А. В. СТЕПАНОВА, к. г.-м. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, чл.-корр. РАН, д. г. н., проф.; Н. В. ШАРОВ, д. г.-м. н.; В. В. ЩИПЦОВ (отв. редактор), д. г.-м. н., проф.

*Издается с января 2009 г.*

Адрес редакции: 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11  
Тел. (8142)762018; факс (8142)769600  
E-mail: [trudy@krc.karelia.ru](mailto:trudy@krc.karelia.ru)

Электронная полнотекстовая версия: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

# **TRANSACTIONS**

**of the KARELIAN RESEARCH CENTRE  
of the RUSSIAN ACADEMY of SCIENCES**

No. 10, 2020

PRECAMBRIAN GEOLOGY Series

Petrozavodsk  
2020

Editor-in-Chief

A. F. TITOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.

Editorial Council

A. M. ASKHABOV, RAS Academician, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; O. N. BAKHMET (Deputy Editor-in-Chief), RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); I. V. DROBYSHEV, PhD (Biol.) (Sweden – Canada); N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; T. E. HANG, PhD (Geog.) (Estonia); P. HÖLTTÄ, PhD (Geol.), Prof. (Finland); E. V. IVANTER, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; H. JOOSTEN, Dr. (Biol.), Prof. (Germany); A. M. KRYSHEN', DSc (Biol.); E. V. KUDRYASHOVA, DSc (Phil.), Prof.; O. L. KUZNETSOV, DSc (Biol.); N. V. LUKINA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; O. OVASKAINEN, PhD (Math.), Prof. (Finland); O. N. PUGACHYOV, RAS Academician, DSc (Biol.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; S. A. SUBBOTIN, PhD (Biol.) (USA); D. A. SUBETTO, DSc (Geog.); K. SZAJEWSKI, PhD (Math.), Prof. (Poland); A. V. VORONIN, DSc (Tech.), Prof.

Editorial Board of the "Precambrian Geology" Series

N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.); V. V. KOVALEVSKY, DSc (Geol.-Miner.); V. S. KULIKOV, DSc (Geol.-Miner.); Yu. A. MOROZOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geol.-Miner.); A. V. PERVUNINA (Executive Secretary), PhD (Geol.-Miner.); A. M. PYSTIN, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; A. V. SAMSONOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geol.-Miner.); N. V. SHAROV, DSc (Geol.-Miner.); V. V. SHCHIPTSOV (Editor-in-Charge), DSc (Geol.-Miner.), Prof.; A. I. SLABUNOV, DSc (Geol.-Miner.); A. SOESOO, PhD (Geol.), Prof. (Estonia); A. V. STEPANOVA, PhD (Geol.-Miner.); S. A. SVETOV (Deputy Editor-in-Charge), DSc (Geol.-Miner.), Prof.; O. I. VOLODICHEV, DSc (Geol.-Miner.); Yu. L. VOYTEKHOVSKIY, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; A. B. VREVSKIY, DSc (Geol.-Miner.), Prof.

*Published since January 2009*

*Monthly*

Editorial Office address: 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia

Tel. (8142)762018; fax (8142)769600

E-mail: [trudy@krc.karelia.ru](mailto:trudy@krc.karelia.ru)

Full-text electronic version: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

© Karelian Research Centre, Russian Academy of  
Sciences (KarRC RAS), 2020

© Institute of Geology of KarRC RAS, 2020

УДК 553.576 (470.2)

## **КВАРЦЕВОЕ СЫРЬЕ КАРЕЛО-КОЛЬСКОГО РЕГИОНА: ОСНОВНЫЕ ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**В. В. Щипцов, Т. П. Бубнова, Е. Н. Светова, Л. С. Скамницкая**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

В статье обращено внимание на то, что кристаллическая решетка кварца допускает весьма ограниченный изоморфизм, большинство элементов, отмечаемых в кварце (Na, K, Ca, Mg, Ba, Sr, Rb, REE, Mn, U, Th), имеют связь с флюидными и микроминеральными включениями. Кварц рассматривается как промышленный минерал с главным акцентом на его использование в качестве высокочистого кварца. Приведена схема применения кварца и продуктов его технологического передела в промышленности. Охарактеризованы в исторической последовательности этапы исследований кварцевого сырья Карело-Кольской кварцевой провинции и показана промышленная значимость различных генетических типов месторождений кварца (жильный, пегматитовый, силекситовый, высокочистые кварциты, мусковитовые и кианитовые кварциты, кварцевые конгломераты, силициты). Даны комплексные характеристики основных месторождений кварцевого сырья на текущий момент (Перчатка, Фенькина-Лампи, Меломайс и Степаново озеро). Показана роль исследований Института геологии КарНЦ РАН в получении результатов, позволяющих определять новые подходы к оценке кварцевого сырья Карело-Кольского региона. Благодаря работе сотрудников ИГ КарНЦ РАН совместно с коллегами из других организаций страны (ВИМС, ИГЕМ РАН, ИГ Коми НЦ УрО РАН, ГИ КНЦ РАН, ЦНИИГеолнеруд, Центркварц) внесен значительный научный вклад в оценку кварцевого сырья Карело-Кольской кварценозной провинции России на современном уровне. Предлагаемые решения опробованы на примере способов оценки качества исходного сырья и технологии обогащения на материале природного кварца объектов Перчатка, Меломайс, Рухнаволок и др.

**Ключевые слова:** кварцевое сырье; Карело-Кольская провинция; высокочистый кварц; качество кварца; технология обогащения; прогнозирование.

### **V. V. Shchiptsov, T. P. Bubnova, E. N. Svetova, L. S. Skamnitskaya. QUARTZ RAW MATERIALS OF THE KARELIAN-KOLA REGION: MAJOR RESEARCH RESULTS**

The article draws attention to the fact that the crystal lattice of quartz allows for very little isomorphism, most elements encountered in quartz (Na, K, Ca, Mg, Ba, Sr, Rb, REE, Mn, U, Th) are associated with fluid and micromineral inclusions. Quartz is regarded as an industrial mineral with the main focus on its use as high-purity quartz. The scheme of the industrial application of quartz and the products of its technological processing is provided. The chronological sequence of stages in research on quartz raw materials in the Karelian-Kola quartz province is described, and the industrial significance of various genetic types of quartz deposits (vein, pegmatite, silixite, high-purity quartzites, muscovite and kyanite quartzites, quartz conglomerates, silicites) is demonstrated. The various characteris-

tics of the main deposits of quartz raw materials at present (Perchatka, Fen'kina-Lampi, Melomais, and Stepanovo Ozero) are reported. The role of the Institute of Geology KarRC RAS in producing recent results allowing new approaches to the assessment of quartz raw material in the Karelian-Kola region to be designed is highlighted. The work of IG KarRC RAS staff in collaboration with other organizations in the country (VIMS, IGEM RAS, IG Komi SC Ural Branch RAS, GI KSC RAS, TsNIIgeolnerud, Tsentrkvarz) has contributed significantly to the science-based assessment of quartz raw material in the Karelian-Kola quartziferous province of Russia. The proposed solutions have been tested in application to the methods for evaluating the quality of raw materials and enrichment technology using natural quartz from Perchatka, Melomais, Rukhnavolok, etc.

**Key words:** quartz raw material; Karelian-Kola Province; high-purity quartz; quality, enrichment technology; forecasting.

### **Общие сведения о высокочистом кварце и областях его использования**

Кварцевое сырье (высокочистое кварцевое сырье (ВЧК), high purity quartz) является одним из важнейших стратегических видов минеральных продуктов. На высокочистые кварцевые концентраты отмечается постоянно увеличивающийся спрос на мировом рынке. Кристаллическая решетка кварца допускает весьма ограниченный изоморфизм, вследствие чего содержание структурных примесей в кварце обычно невелико. К основным структурным примесям относятся  $Al^{3+}$ ,  $Ga^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Ge^{4+}$ ,  $Ti^{4+}$ ,  $P^{5+}$  [Weil, 1984, 1993], при этом содержание Al с близким к Si радиусом может достигать 1000 ppm. Ti и Fe могут быть ионами замещения или входить в состав минеральных микровключений, таких как рутил и окислы железа. Другие катионы  $H^+$ ,  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cu^+$  и  $Ag^+$  отмечаются в интерстициях как ионы-компенсаторы. Большинство элементов, отмечаемых в кварце (Na, K, Ca, Mg, Ba, Sr, Rb, REE, Mn, U, Th), связаны с флюидными и микроминеральными включениями, что необходимо принимать во внимание в процессах глубокого обогащения.

Микроэлементы важны при определении обстановки зарождения кварца, выбора путей очистки кварца и направлений использования в промышленности. Наиболее низкие содержания микроэлементов характерны для низкотемпературного (480–530 °C) кварца [Blankenburg et al., 1994]. К ВЧК, используемому в высоких технологиях, в мировой практике относят продукт с содержанием  $SiO_2$  более 99,997 % (примеси составляют менее 30 ppm).

Новым крупномасштабным рынком потребления ВЧК становится рынок производства «солнечного» кремния – кремния для производства солнечных батарей. Кроме рынка кварцевых концентратов широко развит рынок кварцевых порошков. Основное применение

кварцевых порошков – это производство эпоксидной пресс-массы для изготовления интегральных микросхем (70 %), огнеупоры (15 %) и точное литье (15 %) [The economics..., 1992; Quartz..., 2012; Flook, 2013]. Основные области применения кварца и продуктов его технологического передела приведены на рис. 1.

На современном этапе рынок ВЧК практически монополизирован компанией Unimin – ее доля составляет 80 %. Вторым по значимости игроком на данном рынке является норвежско-американская корпорация The Quartz Corporation Norway-USA – 8 %. Определенную роль в конкуренции производства ВЧК играют такие страны, как Бразилия и Мадагаскар, поставляющие на рынок природный чистый кусковой кварц. В конце 2011 г. норвежская компания Norwagian Crystals и американская Imerys (владелец права на кварцевое месторождение в Северной Каролине) объединились в кварцевую корпорацию (TQC). Китайские и российские производители выпускают соответственно 7 и 5 % ВЧК [Quartz..., 2012].

### **Карело-Кольская кварценозная провинция**

В СССР интерес к кварцевому сырью был весьма многосторонний и широкий. Карело-Кольская провинция является одной из перспективных территорий РФ на ВЧК. В ее пределах выявлены площади развития кварцевых жил, пегматитов, силекситов, высокочистых кварцитов, мусковитовых и кианитовых кварцитов, кварцевых конгломератов, силицитов (рис. 2). Исторически перспективность Карело-Кольской кварценозной провинции определялась исключительно промышленной значимостью пегматитового кварца Енско-Чупинской кварценозной области, геодинамически связанной с Беломорским подвижным поясом. Выводы тех лет проистекали из результатов

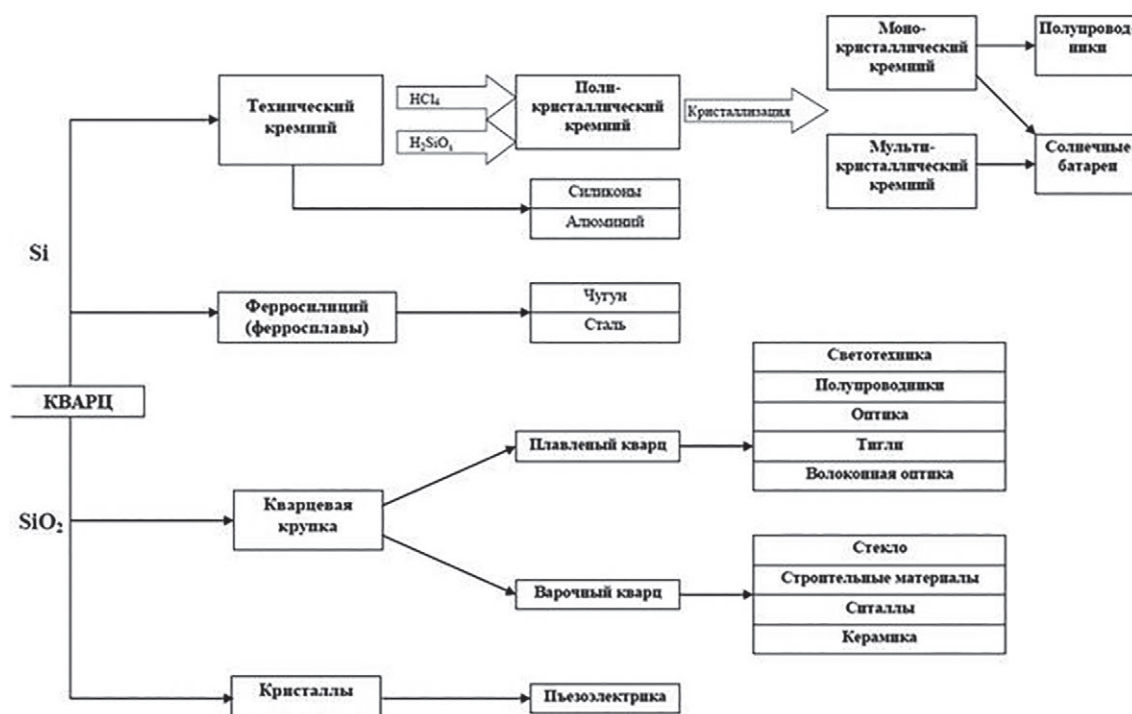


Рис. 1. Схема применения кварца и продуктов его технологического передела в промышленности [Щипцов, 2019]

Fig. 1. Scheme of application of quartz and products of its technological conversion in industry [Shchiptsov, 2019]

геолого-поисковых и разведочных работ, полученных в разное время в Карело-Кольском регионе.

Среди геолого-производственных работ, проводившихся на территории Мурманской области, необходимо выделить исследования А. П. Вушанова, Н. Г. Добрыниной, М. А. Цибульчика – кварциты Рижгубы (1961 г.); В. М. Глазунова с коллегами – кварцевые жилы Малых Кейв (1987 г.); С. В. Жабина и А. М. Гершенкопа с коллегами – мелко-размерный мусковит из пегматитовых отвалов рудника Риколатва (1996–1997 гг.); Н. В. Казакова, Н. П. Костелова, М. М. Калинкина, Ю. А. Шатнова – высокочистое кварцевое сырье Кейвского кварценосного узла (1993–1996, 1998–2001 гг.); В. А. Смирновой (1993 г.), Н. Я. Юркова – Енское кварцево-жильное поле (2001–2003 гг.).

Обобщенные результаты работ на кварцевые ресурсы Мурманской области приводятся в определенных источниках [Липовский, 1991; Данилевская, 2012а, б, в и др.]. К предварительному итогу поисковых и поисково-оценочных работ на Кейвской площади относится выделение четырех кварцевых полей жильного типа – Семиостровское, Выхчуртское, Червуртское и Боллоуртинское, три из которых, исклю-

чая Выхчуртское, отнесены к перспективным на высококачественный жильный кварц. Кроме кварцевых жил в границах Кейвского домена распространены кварцсодержащие породы метаморфогенно-метасоматического генезиса, которые могут представлять интерес в качестве нетрадиционных источников кварцевого сырья. К ним относятся мусковитовые кварциты, залегающие в Центральных и Западных Кейвах, с содержанием кварца 85–90 %, а также измененные под воздействием метасоматических процессов кианитовые сланцы с голубым кианитом. По форме они представлены вытянутыми линзами, содержащими кварц до 70 % на контактах кварцитов и гранат-ставролитовых сланцев. В 2015 г. ОАО «Северкварц-самоцветы» завершило поисково-оценочные работы на ВЧК на Червуртском рудном поле. Ресурсы на объекте оценены как значительные. Предварительно оцененные запасы ВЧК Червуртского месторождения поставлены на государственный баланс.

Разработка кварцитов Рижгубского месторождения проводилась с 1938 года. Пластообразные залежи до четырех с половиной километров по протяженности при мощности около 15 метров согласно залегают в хлорит-кварцевых, серицит-кварцевых сланцах и кристалли-

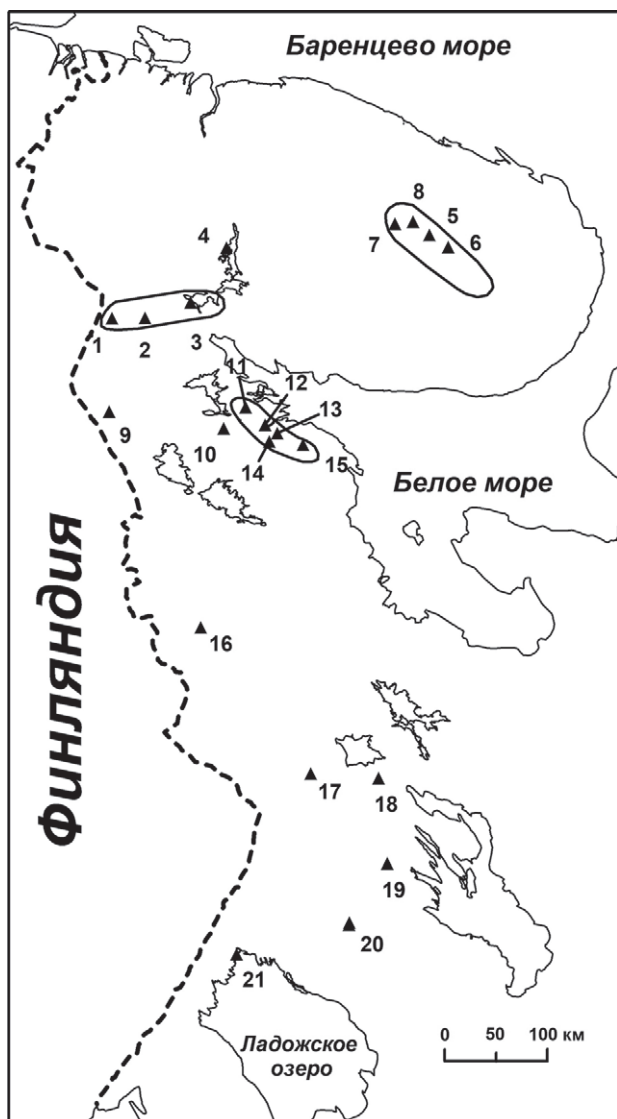


Рис. 2. Схема размещения месторождений и крупных проявлений кварцевого сырья Карело-Кольского региона.

Енский пояс кварцевого сырья: 1 – Перчатка, 2 – Ена, 3 – Риколатва. 4 – Рижгуба. Кейвский кварцевый пояс: 5 – Червурта, 6 – Боллоуртинское, 7 – Песцовая Кейва, 8 – Тяпыш-Манюк. 9 – Майское. 10 – Степаново озеро. Чупинский кварцевый пояс: 11 – Тэдино, 12 – Малиновая Варакка, 13 – Плотина, 14 – Слюдозеро, 15 – Никонова Варакка. 16 – Меломайс. 17 – Метчангярви. 18 – Фенькина-Лампи. 19 – Гирвас. 20 – Улялегская группа (Кюръяла, Брусничное, Большое). 21 – Соролонсаари

Fig. 2. Allocation scheme of deposits and large occurrences of quartz raw materials in the Karelo-Kola region.

Ensky quartz raw material belt: 1 – Perchatka, 2 – Ena, 3 – Rikolatva. 4 – Rizhguba. Keivy quartz belt: 5 – Chervurta, 6 – Bollour-tinskoe, 7 – Pestsovaya Keiva, 8 – Tyapush-Manyuk. 9 – Mai-skoe. 10 – Stepanovo Ozero. Chupinsky quartz belt: 11 – Te-dino, 12 – Malinovaya Varakka, 13 – Plotina, 14 – Slyudozero, 15 – Nikonova Varakka. 16 – Melomais. 17 – Metchangyarvi. 18 – Fenkina-Lampi. 19 – Girvas. 20 – Ulyalegskaya group (Kyuryala, Brusnichnoe, Bolshoe). 21 – Sorolansaari

ческих известняках имандра-варзугской серии палеопротерозоя.

Кварцевая минерализация в Енском блоке связана с мономинеральными кварцевыми и пегматитовыми (слюдоносными и керамическими) жилами. На сегодня фаворитным в этом кварцево-жильном поле является месторождение прозрачного жильного кварца Перчатка. В 1989–1992 гг. проведена разведка западного фланга данного месторождения, подсчитаны запасы жильного кварца по этому флангу. В тот же самый период осуществлялась опытно-промышленная разработка карьерным способом для саранского ПО «Лисма». Кварц отвечал требованиям 3-го сорта для плавки прозрачного стекла по ТУ 1982 г. В 2001–2003 гг. проведены дополнительные поисково-оценочные работы в пределах Енского кварцево-жильного поля с целью выделения участков с высокой концентрацией ВЧК жил, а также оконтуриванием жильных зон и отдельных кварцевых жил. Оценочные работы охватывали и юго-восточный фланг месторождения Перчатка.

Кварцеметрическая съемка также проводилась на участках «Нора», в 7 км к юго-востоку от поселка Слюда, «Кайта», расположенном в 50 км к западу от г. Кандалакши, и на отдельной площади в 45 км к северо-востоку от поселка Алакуртти. В результате работ выявлена повышенная кварценосность в юго-западном борту Енской зоны.

В пределах Енского района расположено одно из крупных месторождений мусковита Риколатва. В 2001 г. в результате технологических исследований кварца Риколатвинского месторождения отработана схема обогащения с получением концентрата, соответствующего сортам КГО и КПО-2 по разным пробам по ТУ 1997 г. Добыча кварца из отвалов при комплексной переработке на мелкогабаритный мусковит, полевой шпат значительно повышает ценность этих техногенных отложений и рентабельность их разработки.

В послевоенный период в Карелии геологоразведочные работы на кварцевое сырье проводились периодически различными геологическими организациями Мингео СССР, РСФСР и МПСМ СССР, в том числе Северной экспедицией ПГО «Севзапгеология» и ГОКом «Карелслюда». Здесь необходимо выделить значимые геологические производственные работы прошедших лет. Изучение (под руководством В. И. Сергеева, 1948–1950 гг.) пегматитов и жильного кварца на предмет нахождения кристаллов мориона и горного хрусталя в гранитах Питкяранты и гранит-рапакиви Улялегского массива, пригодных на пьезокварц (как и на Терском берегу Белого моря, промышленный пьезокварц обнаружен не был).



Ленгеолнерудтрест МПСМ СССР (В. Л. Васютович, Л. М. Дробышевская, Б. И. Ревнов и др., 1950-е годы) впервые провел ревизионно-оценочные работы на кварцевое сырье по 139 пегматитовым жилам Северной Карелии с целью выявления сырьевой базы для производства высококачественного оптического стекла. Г. Н. Николаевский и З. А. Зиновьева выполняли поисково-разведочные работы с целью выявления высококремнистых пород, пригодных для получения в основном карбида кремния на участке Фенькина-Лампи в Медвежьегорском районе (1963 г.). Государственный научно-исследовательский институт кварцевого стекла (ГОСНИИКС) проводил поисковые работы с целью оценки возможности использования молочно-белого кварца месторождений Малиновская Варакка и Карельский для производства прозрачного кварцевого стекла (1966–1968 гг.). ПО «Северкварцсамоцветы» выполнило поисково-оценочные работы на жильный кварц на Чупинском пегматитовом поле для плавки прозрачного кварцевого стекла и варки оптического стекла (1976–1977 гг.), а также разведку кварцитов ятулийского надгоризонта, в которых были открыты месторождения высокочистых кварцитов Метчангъярви 1 и 2, Нестеро-

ва Гора, Боконвара, Шалговара (Д. В. Задков и др., 1983–1991 гг.). В. С. Родионов, А. М. Кокконен, А. И. Кравченко, А. А. Ярмак, А. В. Абрамов, Ю. М. Салтыков и др. (Северная ПРЭ, ГосНИИКС, ВНИИСИМС, ГОК «Карелслюда», лаборатории Центрально-Уральской ГРЭ, МГРИ, Гусевский завод им. Дзержинского, Южно-Уральский завод «Кристалл» и ПО «Рубин») провели комплекс исследований кварца Чупы на пригодность для плавки кварцевого стекла, синтеза искусственного кварца и варки многокомпонентного стекла (1985–1990 гг.) с подсчетом запасов, утвержденных ГКЗ СССР (табл. 1) [Салтыков и др., 1990].

В то время был поставлен вопрос о строительстве опытно-экспериментального обогатительного цеха по производству ВЧК, в состав которого должна была войти специализированная лаборатория по исследованию кварца. Это послужило основой для разработки программы геологоразведочных, научно-исследовательских, опытно-экспериментальных работ и промышленных испытаний пегматитового кварцевого сырья Карело-Кольской пегматитовой провинции на перспективу.

Таким образом, по состоянию на 1990 год имелись обоснованные данные для включе-

Таблица 1. Характеристика запасов кварцевого сырья Беломорской пегматитовой провинции [Салтыков и др., 1990]

Table 1. Characteristics of quartz raw material reserves of the Belomorskaya pegmatite province [Saltykov et al., 1990]

Промышленный тип Industrial type	Месторождение Deposit	Запасы, тыс. т. Reserves, thousand tons			
		Всего Total	В	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
Молочно-белый жильный кварц Milky-white vein quartz	Малиновская Варакка Malinovaya Varakka	2024		1817	207
	Плотина Plotina	220		23	197
	Слюдозеро Slyudozero	662			662
Кварц для керамических изделий Quartz for ceramic products	Малиновская Варакка Malinovaya Varakka	110,5		80,8	29,7
	Плотина Plotina	95	5	9,8	80,2
	Слюдозеро Slyudozero	140			140
	Карельское Karelskoe	0,8			0,8
	Станционное Stantsionnoe	4,3		1,5	2,8
	Хетоламбина Khetolambina	46,9	2,5	31,8	12,6
	Уч. Климовский Klimovsky site	34,9		2,9	32
Слюдяной Бор Slyudyanoi Bor	49,4		42,3		

ния Карело-Кольской пегматитовой провинции в число перспективных регионов по созданию сырьевой базы для промышленного производства специальных кварцевых изделий и материалов, отвечающей требованиям как в количественном, так и в качественном отношении, но в силу изменения политической и экономической ситуации в стране и распада СССР эти планы не осуществились.

В условиях рыночной экономики в соответствии с Программой геологоразведочных работ на территории Карелии в 1995–2000 гг. Институтом геологии КарНЦ РАН совместно с Северной поисково-разведочной экспедицией проводились исследования по проекту «Прогнозно-минерагеническое изучение Республики Карелия в масштабе 1:1 000 000 с целью выявления объектов, перспективных на минеральное сырье для производства специальных кварцевых изделий». Основным итогом работы стала прогнозно-минерагеническая карта кварценосности Карелии в масштабе 1:1 000 000 с выделенными минерагеническими зонами, кварценосными районами и узлами, на которой показан ресурсный потенциал не только традиционно известной Беломорской кварценосной провинции, но и всей территории Карелии, основную часть которой занимает Карельский кратон (рис. 2). Кроме того, были даны рекомендации по проведению дальнейших поисковых и прогнозно-минерагенических исследований на территории Карелии [Родионов, Щипцов, 2000; Щипцов и др., 2001; Данилевская и др., 2004 и др.].

В основу данной статьи вошли материалы и результаты последних лет, так как они позволяют определять новые подходы к оценке кварцевого сырья Карело-Кольского региона. В настоящее время проведено ревизионное обследование и опробование потенциально перспективных участков. В результате имеются предпосылки и обоснование для доказательства наличия в докембрийских комплексах региона кварценосных объектов, пригодных для использования в производстве концентратов высокой чистоты. К наиболее существенным предпосылкам, отражающим особенности геодинамических режимов в историческом развитии, могут быть отнесены: наличие мощной коры континентального типа, длительная хронология событий с проявлениями полихронного метаморфизма от зеленосланцевой до гранулитовой фаций в тектонических обстановках субдукций, коллизий, рифтинга и др. К важным результатам региональных исследований следует отнести выявление кварцевых жил, сложенных гранулированным кварцем, которые

приурочены к областям интенсивного развития процессов кислотного выщелачивания и высокобарического метаморфизма. Кроме этого, установлены достаточно чистые по полученным качественным характеристикам сливные кварциты. В прибрежной полосе Белого моря обнаружены россыпи галечного кварца, имеющие потенциальное значение. В составе россыпей галечного кварца содержится до 30 % гранулированного или прозрачного кварца. В целом на территории сформированы полигенетические типы кварца, образованные в каждой региональной структуре. На отдельных участках проведена кварцевометрическая съемка в масштабе 1:50 000 и крупнее. На основе кварцевометрического картирования составлены карты и планы. Составлены также кадастр известных проявлений кварцевого сырья и регистрационная карта основных кварцевых проявлений Карелии в масштабе 1:1 000 000.

Проведено ревизионное лабораторное опробование всех генетических типов кварцевого сырья с отбором представительных проб для лабораторных технологических испытаний. Получены результаты по качественным характеристикам кварцевого сырья основных проявлений, по минералого-технологическим особенностям кварца каждой генетической группы, позволяющие сделать предварительную оценку возможных направлений использования и промышленной значимости конкретных объектов.

### **Основные месторождения кварцевого сырья Карело-Кольского региона**

Объектами исследований выбраны месторождения и проявления кварцевого сырья Карело-Кольской кварценосной провинции, различные по генезису и возрасту от неогена до палеопротерозоя. Ниже приводятся краткие характеристики наиболее крупных кварцевых объектов. В потенциально перспективных районах частично проводились поисково-оценочные работы с предварительной оценкой качества кварцевого сырья; на отдельных объектах осуществлено минералого-технологическое картирование, выполнены исследования по обогатимости кварцевого сырья на малых технологических пробах с разработкой оптимальных схем и получены кварцевые продукты в виде концентратов различного качества и назначения.

**Перчатка.** Месторождение расположено в Енском кварцевом поясе (рис. 3). Вмещающими породами являются биотитовые гнейсы, мигматиты и гранито-гнейсы с подчиненными

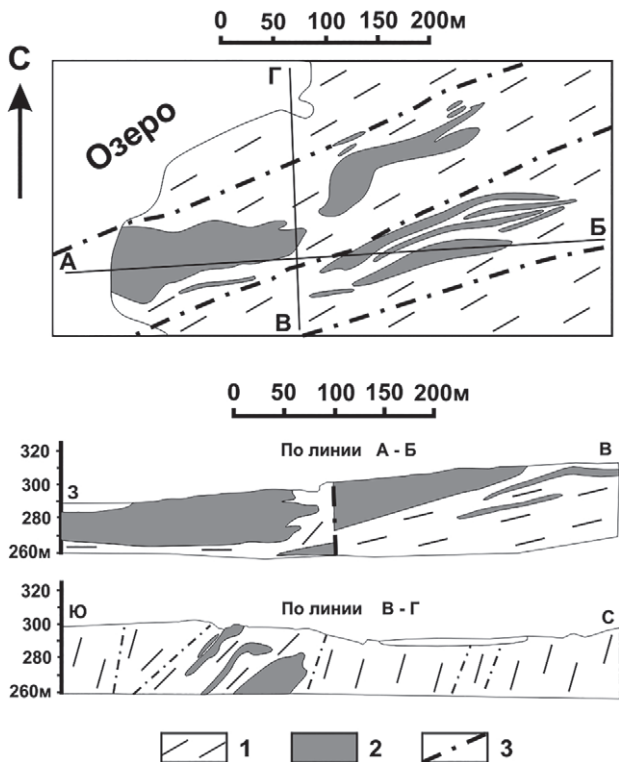


Рис. 3. Схема геологического строения месторождения Перчатка и геологический разрез [Геология..., 2002]:

1 – глиноземистые гнейсы, 2 – кварцевые жилы, 3 – разломы  
 Fig. 3. Scheme of the geological structure of the Perchatka deposit and the geological section [Geologiya..., 2002]:  
 1 – alumina gneiss, 2 – quartz veins, 3 – faults

гранат-биотитовыми и кианит-гранатовыми гнейсами и другими породами беломорского подвижного пояса. Устанавливается четкая приуроченность к тектонической зоне северо-восточного простирания и выделены три основных участка в ней. По простиранию зона прослежена на 450 м, видимая мощность от 80 до 150 м [Геология..., 2002]. Форма тел линзовидная и сложена в основном гранулированным и реже стекловидным кварцем. Гранулированный кварц имеет неравномернозернистую структуру с крупными прозрачными зернами изометрической или вытянутой формы размером 0,2–15 мм на фоне мелкозернистой основной массы. Стекловидный кварц отличается крупно-гигантозернистой структурой. Из минеральных основных включений отмечены полевой шпат, мусковит, биотит, хлорит, апатит и амфиболы. Кварц месторождения характеризуется низкой газонасыщенностью. Светопропускание в среднем составляет 65 %, в некоторых образцах – до 80–85 %. Газово-жидкие включения (ГЖВ) в основном распределены по тре-

щинкам залечивания на границах зерен кварца [Данилевская, Скамницкая, 2010].

Малообъемное технологическое обогащение проб кварца, отобранных на разных участках месторождения Перчатка, проведено в Институте геологии КарНЦ РАН по единой схеме для стекловидного, гранулированного и сильно минерализованного кварца из зон трещиноватости. Кварц не проходил предварительную ручную сортировку. В обогащенных кварцевых концентратах установлено повышенное содержание Al и Na, в то время как концентрации Ca, K, Mg, Fe и Ti значительно варьируют в разных пробах. Сделан вывод, что неоднородность сырья, значительные потери при переработке (ручной рудоразборке), ужесточение требований к кварцевым концентратам высокой чистоты, в том числе по спектру примесей, определяют актуальную необходимость переоценки важного минерального сырья, требуют поиска новых подходов к его оценке и переработке [Данилевская, Скамницкая, 2010].

**Меломайс.** В гранито-гнейсах северо-западной части Карельского кратона выявлена мощная кварцево-жильная зона субмеридионального простирания, которая по своим масштабам является уникальным проявлением кварца на территории Фенноскандинавского щита. Данный участок Меломайс расположен в Калевальском районе Республики Карелия (рис. 4).

Кварцевая жила залегает согласно сланцеватости вмещающих пород, представленных микроклинизированными гранито-гнейсами. На контакте с кварцевой жилой гранито-гнейсы претерпели значительное окварцевание и милонитизацию, что определяет большое влияние тектонического фактора во время формирования кварцевого тела. Северо-западное простирание кварцевого тела, падение крутое, выявленная длина составляет более 1,5 км, а максимальная видимая мощность жилы – около 130 м. Кварцевая жила подвергнута интенсивному позднему рассланцеванию, особенно в краевых частях, где наблюдаются тонкие чередующиеся прослои, сложенные мелкозернистым кварцем и материалом полевошпато-слюдисто-эпидотового состава [Данилевская и др., 2004]

По минеральному составу кварцевая жила довольно однородна, суммарное содержание минеральных примесей варьирует от 1 до 5 %. Минеральные примеси представлены мусковитом, биотитом, хлоритом, калиевым полевым шпатом, эпидотом. В качестве акцессорных минералов встречаются редкие зерна циркона, фторапатита и рутила. Газонасыщенность кварца невысокая.

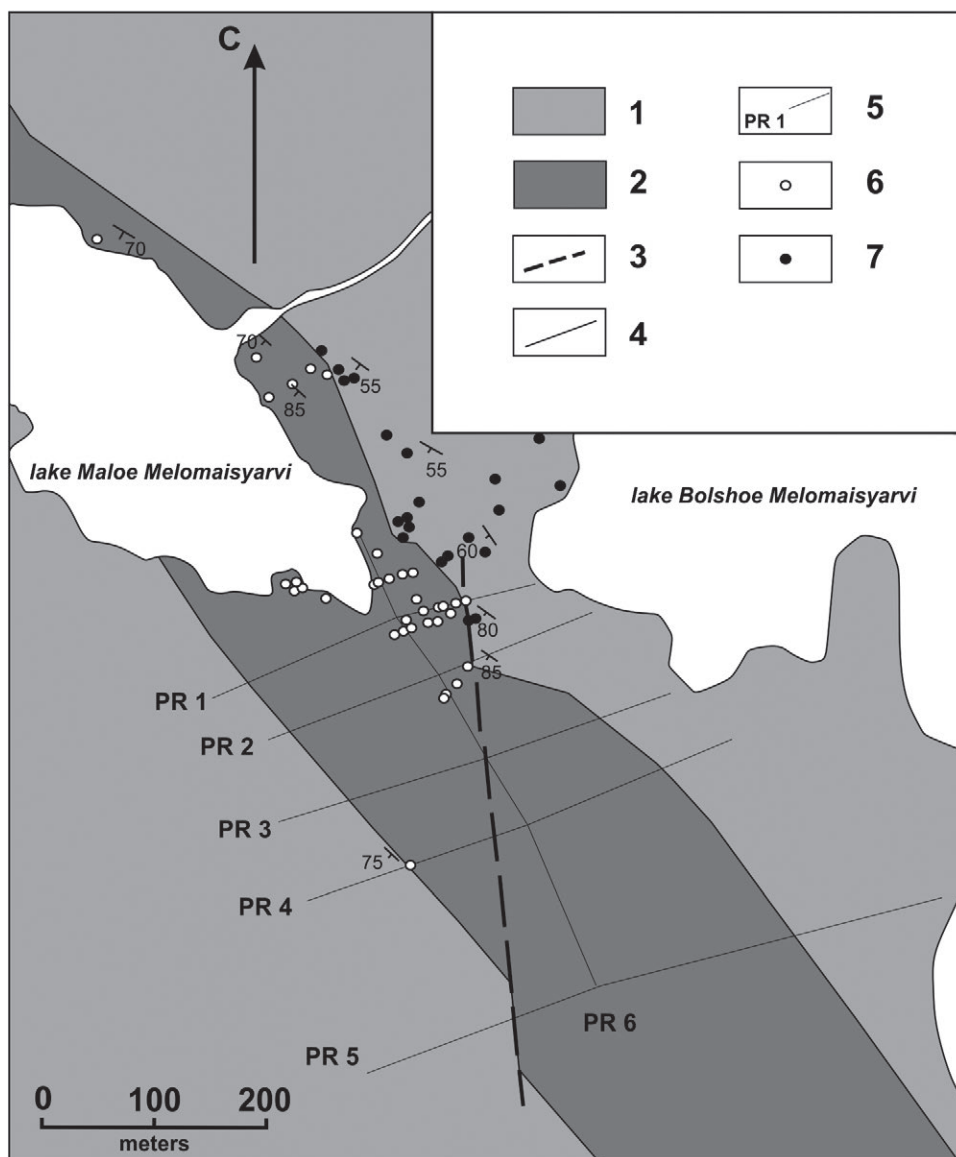


Рис. 4. Геологическая схема участка Меломайс (сост. Л. А. Данилевская, В. В. Щипцов, А. В. Гаранжа [Костомукшский..., 2015]):

1 – гнейсо-граниты, 2 – кварцевая жила, 3 – выходы жильного кварца, 4 – точка контакта гнейсо-гранитов и жильного кварца, 5 – выходы гнейсо-гранитов, 6 – геофизические профили

Fig. 4. Geological scheme of the Melomays site (compiled by L. A. Danilevskaya, V. V. Shchiptsov, A. V. Garanzha [Kostomukshskii..., 2015]):

1 – gneiss-granites, 2 – quartz vein, 3 – outputs of vein quartz, 4 – contact point of gneiss-granites and vein quartz, 5 – outcrops of gneiss-granites, 6 – geophysical profiles

Технологические испытания кварца проведены в Институте геологии КарНЦ РАН (предварительное малое обогащение) и в лаборатории ОАО «Полярный кварц» (глубокое обогащение). Среднее содержание  $\text{SiO}_2$  в пробах исходного необогащенного кварца составляет 96,84 % при вариациях от 90,6 до 98,8 %. Характерно повышенное содержание примесей  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{K}_2\text{O}$ , что связано с присутствием минеральных включений, а также  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{FeO}$ , которые обусловлены в основном наличием гидроокислов железа.

Кварцевый продукт после операций предварительной очистки отвечает требованиям стекольной промышленности для производства изделий высокой светопрозрачности, а также может быть легко применим для производства диносовых изделий и карбида кремния. Кроме того, кварцевые концентраты после стадий предварительного обогащения соответствуют требованиям промышленности для производства кристаллического кремния [Костомукшский..., 2015].

Весь комплекс проведенных исследований дал возможность оценить потенциал кварца крупного кварценосного тела Меломайс. На данный момент целесообразна постановка дальнейших укрупненных исследований кварцевого сырья с целью оценки его для производства кристаллического кремния, который, в свою очередь, является источником для получения поликристаллического кремния. Актуальность этой задачи определяется прежде всего высоким мировым спросом на поликристаллический кремний для полупроводниковой промышленности и солнечной энергетики. Кроме того, постоянно расширяется спектр применения металлического кремния и феррокремния. Феррокремний является самым крупнотоннажным и выгодным ферросплавом, что связано с направлениями высокотехнологичных производств современной промышленности. Отмечается также рост потребления кремния в химической промышленности, производстве силиконовых (кремнийорганических) материалов для изготовления пластмасс, лакокрасочной продукции и т. п.

**Фенькина-Лампи.** Месторождение жильного кварца Фенькина-Лампи (Медвежьегорский район) является разведанным месторождением [Голованов и др., 2006] и представлено двумя разобщенными кварцевыми телами, различными по форме и размерам. Северная линза имеет длину 245 м, мощность до 70 м, а Южная линза – 120 м при максимальной мощности 20 м (рис. 5). Вмещающие породы представлены полевошпат-кварцевыми песчаниками и карбонатизированными песчано-глинистыми сланцами ятулия. Выделяются четыре типа кварца, которые образуют небольшие зоны и участки: I – молочно-белый крупно-гигантозернистый, II – серовато-белый средне-крупнозернистый, III – светло-серый средне-крупнозернистый, IV – серый средне-крупнозернистый, кавернозный (рис. 5). Кварц в основной массе непрозрачный из-за большого количества ГЖВ, которые образуют густую сеть и придают кварцу молочно-белую окраску.

Первичные зерна кварца образуют крупные вытянутые индивиды размером 1–3 см. В пределах кварцевых тел развита сеть вторичных прожилков с мелкозернистым, более прозрачным кварцем, которые приурочены к вторичным трещинам, иногда образующим занорыши. Кварц данного месторождения характеризуется низким светопропусканием (в среднем 40 %, при вариациях от 17 до 53 %) из-за большого количества флюидных включений. Полученные результаты в ходе исследования ГЖВ позволяют говорить о смене температурных режимов

от низко- до высокотемпературных при формировании жильного кварца [Данилевская, Гаранжа, 2003].

Предварительное обогащение кварца с использованием магнитной сепарации и кислотооттирки показало, что в кварцевых концентратах сохраняется большое количество примесей Fe, K, Na, Ca, Mg. Высокие концентрации этих элементов связаны с минеральными и газовой-жидкими включениями, не удалившимися в процессе очистки. В целом данный кварц пригоден для использования в стекольной промышленности, а по некоторым пробам можно судить о соответствии требованиям ТУ 41-07-014-86 (сорт КЖ-3) для выращивания монокристаллов [Данилевская и др., 2004]. В целом кварц имеет высокий потенциал и подлежит доисследованию. В этом направлении в настоящее время проводятся эксперименты в области технологии глубокой очистки кварца. Предложено использование нестандартных подходов, учитывающих наличие низкотемпературных и высокотемпературных форм ГЖВ в кварце [Светова и др., 2019; Светова, Шанина, 2019]. К таким операциям может быть отнесена сверхвысокочастотная обработка кварцевой крупки, показывающая эффективность в отношении удаления ГЖВ.

**Степаново озеро.** Интенсивная тектоническая активизация в свекофеннский период на участке Степаново озеро (Лоухский район) привела к интенсивному метаморфизму пород в условиях амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций. При этом кварцито-песчаники ятулия метаморфизовались в прослои сливных кварцитов. Метаморфогенно-метасоматические изменения кварцитов происходили при участии углекисловодных растворов, о чем свидетельствуют флюидные включения с высоким содержанием газовой фазы.

В кварцсодержащей толще выделяются четыре разновидности кварца: 1 – серые до светло-серых мелко-среднезернистые кварциты, сливные с ветвящимися кварцевыми жилками мощностью до 0,5 м; 2 – серые до светло-серых мелкозернистые сливные кварциты с прослоями со следами ожелезнения; 3 – серые до темно-серых массивные мелкозернистые кварциты с тонкими прослоями ожелезнения и серицитизации; 4 – рассланцованные, сильно ожелезненные, серицитизированные серые до темно-серых мелкозернистые кварциты. Первые два типа приурочены к центральной части кварцевой толщи, а последний тип наблюдается только на периферийных участках (рис. 6).

Содержание кварца в кварцитах варьирует от 88 % (в серицитизированных серых кварци-

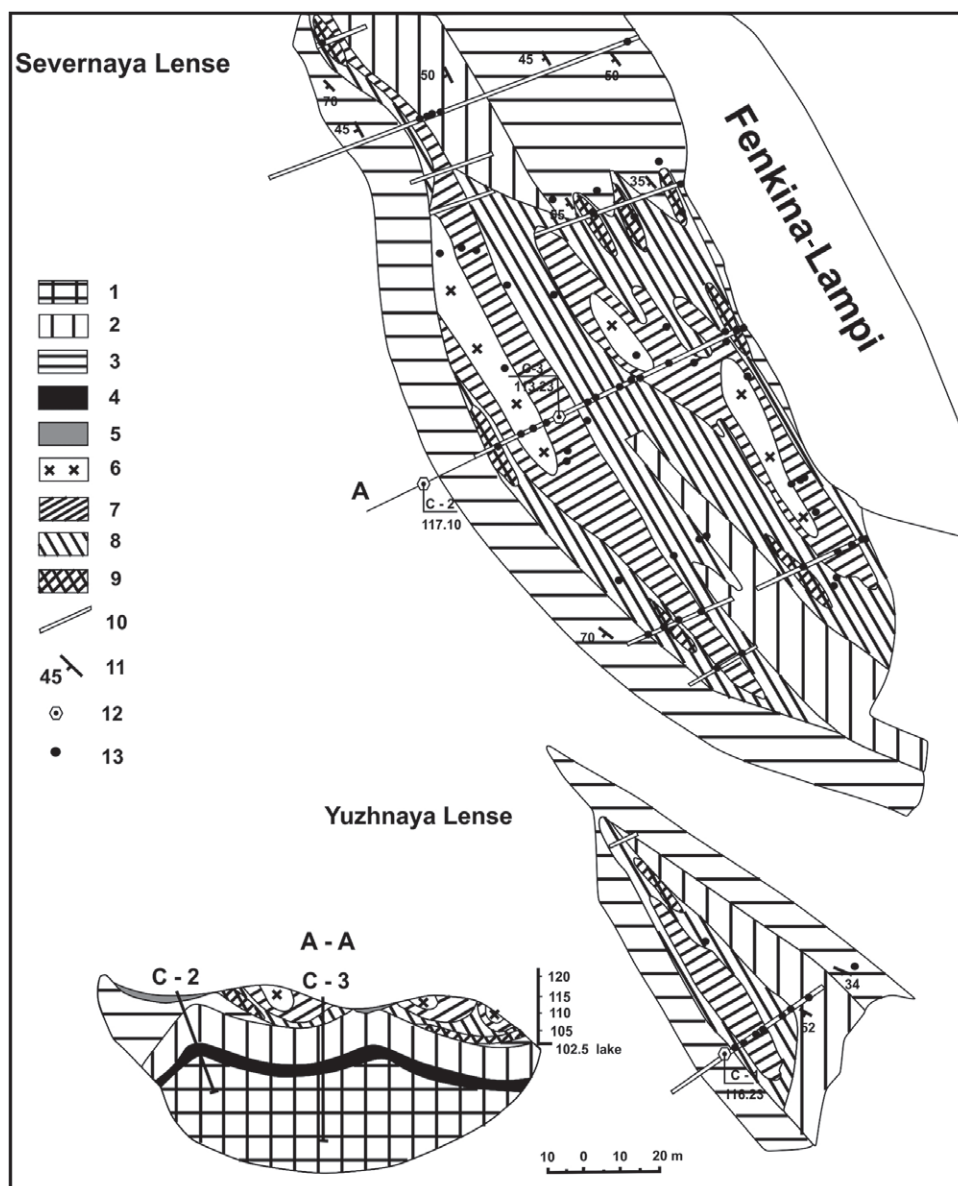


Рис. 5. Геологическая схема месторождения жильного кварца Фенькина-Лампи (сост. А. В. Гаранжа, Л. А. Данилевская, А. А. Иванов (1998 г.) на основе геологической схемы Г. Н. Николаевского и З. А. Зиновьевой (1962 г.):

1 – метадиабаз, 2 – тальк-карбонатные, песчано-глинистые сланцы, 3 – кварцито-песчаники, 4 – кварцевые конгломераты, 5 – четвертичные отложения. Кварц: 6 – молочно-белый крупно-гигантозернистый, 7 – серовато-белый средне-крупнозернистый, 8 – светло-серый средне-крупнозернистый, 9 – серый средне-крупнозернистый, кавернозный, 10 – канавы, 11 – элементы залегания, 12 – скважины, 13 – места отбора проб

Fig. 5. Geological scheme of the Fenkin-Lampi vein quartz deposit (compiled by A. V. Garanzha, L. A. Danilevskaya, A. A. Ivanov (1998) based on the geological scheme of G. N. Nikolaevsky and Z. A. Zinovieva (1962)):

1 – metadiabase, 2 – talc-carbonate, sand-clay shales, 3 – quartzite-sandstones, 4 – quartz conglomerates; 5 – Quaternary deposits. Quartz: 6 – milky-white coarse-giant-grained; 7 – grayish-white medium-coarse-grained; 8 – light gray medium-coarse-grained; 9 – gray medium-coarse-grained, cavernous; 10 – trenches; 11 – elements of occurrences; 12 – shallow bore-holes; 13 – sampling sites

тах приконтактной части) до 100 % (в сливных кварцитах и кварцевых жилках). Структура породы меняется от мелкозернистой в кварци-

тах к более крупнозернистой гранобластовой в жильном кварце. Основной минеральной примесью является мусковит, который развивает-

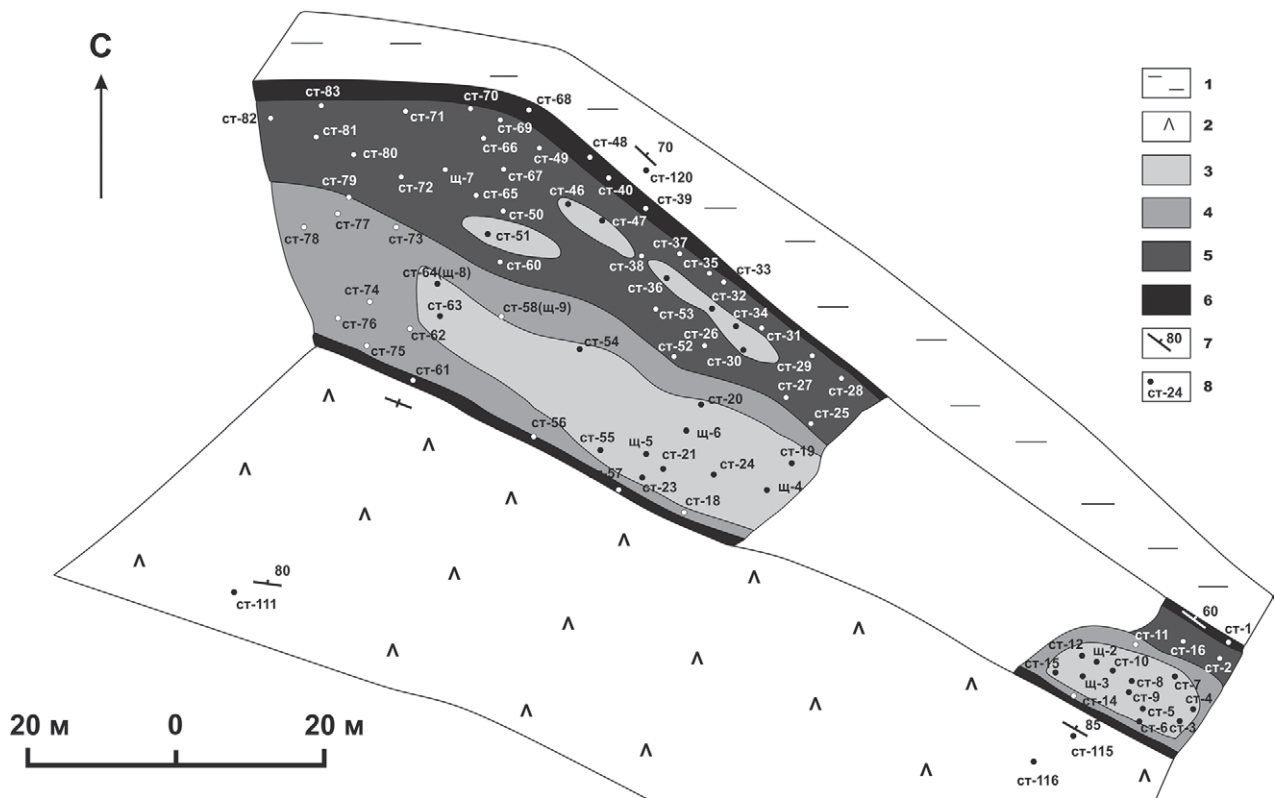


Рис. 6. Геологический план размещения кварцитов участка Степаново озеро (адаптированный по материалам Л. А. Данилевской, А. В. Гаранжи [Родионов, Щипцов, 2000]):

1 – двуслюдяные сланцы с гранатом; 2 – мелкозернистые амфиболиты с биотитом; кварциты: 3 – серые до светло-серых мелко-среднезернистые сливные кварциты с кварцевыми прожилками; 4 – серые до светло-серых мелкозернистые сливные кварциты; 5 – серые массивные мелкозернистые кварциты с прослоями ожелезнения и серицитизации; 6 – рассланцованные, сильно ожелезненные, серицитизированные мелкозернистые кварциты; 7 – элементы залегания; 8 – точки отбора проб

Fig. 6. Geological scheme of quartzites of the Stepanovo Ozero site (adapted from the materials of L. A. Danilevskaya, A. V. Garanzha [Rodionov, Shchiptsov, 2000]):

1 – double-mica schists with garnet; 2 – fine-grained amphibolites with biotite; quartzites: 3 – gray to light gray fine-medium-grained drain quartzites with quartz veins; 4 – gray to light gray fine-grained drain quartzites; 5 – gray massive fine-grained quartzites with layers of ironing and sericitization; 6 – shaved, strongly ironing, sericitized fine-grained quartzites; 7 – bedding elements; 8 – sampling points

ся в основном по субпараллельным трещинам и иногда в виде мелкодисперсных включений находится внутри зерен кварца. В качестве аксессуарных минералов встречаются рудные (пирит, сфалерит), апатит, клиноцоизит. Определяются постепенные переходы от серицитизированных мелкозернистых кварцитов (средние размеры зерен 0,2–2,5 мм) к сливным кварцитам, в которых уменьшается количество минеральных примесей и увеличивается размер зерен до 4–6,5 мм. Структура жильного кварцевого агрегата аналогична кварцитовой, размеры зерен в среднем от 2 мм до 1,2 см. В крупных зернах кварца зафиксированы субструктуры линейно-блокового, брусковидно-блокового, сетчатого погасания, а также мозаичность.

Реликтовые участки слабоизмененного кварцита имеют микропорфириобластовую

структуру и линейно-параллельную текстуру. Окатанные и полуокатанные зерна кварца размером 0,06–0,35 мм составляют основную массу породы, в которой наблюдаются крупные порфириобласты изометричной формы с заливчатыми краями. Вместе с серицитом в виде минеральной примеси присутствуют изометричные зерна плагиоклаза [Данилевская и др., 2004].

Суммарное содержание элементов-примесей в кварцитах участка Степаново озеро невысокое. Отмечается рафинирование кварца от мелкозернистых кварцитов к сливным кварцитам и кварцевым прожилкам. По содержанию элементов-примесей предварительно обогащенного кварцевого сырья этого участка кварц по разным пробам соответствует сортам КПО-3, КПО-4 и КПО-5

ТУ 5726-002-114996665-97 (кварц промежуточной чистоты для плавки прозрачного стекла). Однако для всех проб характерно повышенное содержание Ti, по-видимому, связанного с присутствием волосовидных включений рутила в зернах кварца, что значительно затрудняет процесс глубокого обогащения данного сырья [Данилевская и др., 2004]. Эта проблема ждет своего решения.

## Геолого-минералогическая и технологическая оценка

### Геохимические характеристики кварца

Важнейшую информацию об условиях образования кварца и его посткристаллизационной «адаптации» к окружающей среде в течение геологических интервалов времени несут сведения о составе и содержании всегда присутствующих в кварце рассеянных элементов-

примесей. В связи с этим в целой серии работ института рассматривалась геохимия кварца [Shchiptsov et al., 1997, 1999; Родионов, Щипцов, 2000; Данилевская и др., 2004; Данилевская, Скамницкая, 2007 и др.]. В табл. 2 приводятся результаты геохимических исследований кварца территории Республики Карелия, полученные по основным генетическим типам по трем региональным структурам – Беломорский подвижный пояс, Карельский кратон и протерозойская Ладожская структура.

### Оценка условий минералообразования кварца

Условия минералообразования могут влиять на неоднородность формы и строения микроблоков кварца. Эта неоднородность, выявляемая методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), проявляется в неодинаковом размере микроблоков, различной степени их

Таблица 2. Главные элементы-примеси в природном кварце Карелии, ppm

Table 2. The main trace elements in Karelian natural quartz, ppm

Тип кварца Quartz type	Al	Fe	Na	K	Ti
Беломорский подвижный пояс Belomorian mobile belt					
Жильный кварц Veined quartz	$\frac{46-1200}{306}$	$\frac{3-15}{12}$	$\frac{6-530}{130}$	$\frac{6,4-19900}{2117}$	$\frac{3,1-12}{9,52}$
Галечный кварц (морские россыпи) Quartz pebbles (sea placers)	$\frac{37-642}{48}$	$\frac{2,6-13}{6}$	$\frac{16-42}{32}$	$\frac{4,8-6,2}{5,6}$	$\frac{4-20}{8,3}$
Силекситовый кварц Silexitic quartz	$\frac{85-160}{128}$	$\frac{1,77-94}{33}$	$\frac{30-100}{66}$	$\frac{5-13}{8,7}$	$\frac{4-7}{4}$
Пегматитовый кварц Pegmatitic quartz	$\frac{56-840}{226}$	$\frac{0,1-120}{43}$	$\frac{15,4-340}{125}$	$\frac{5-490}{79}$	$\frac{2-11,3}{5,8}$
Карельский кратон Karelian craton					
Жильный кварц Veined quartz	$\frac{21-470}{98}$	$\frac{1,1-8,8}{2}$	$\frac{6,9-250}{50}$	$\frac{1-82}{32}$	$\frac{0,3-37}{6}$
Силекситовый кварц Silexitic quartz	$\frac{27-32}{29}$	$\frac{6-13}{9,5}$	$\frac{24-37}{30}$	$\frac{4,3-8,3}{6,3}$	$\frac{1-1,2}{1,1}$
Пегматитовый кварц Pegmatitic quartz	150	26	96	5	5
Кварциты Quartzitic quartz	$\frac{47-2200}{1144}$	$\frac{3,3-650}{90}$	$\frac{6,6-1700}{777}$	$\frac{5-1200}{340}$	$\frac{3-64}{23}$
Кварцсодержащие породы Quartz from quartzbearing rocks	$\frac{250-820}{540}$	$\frac{65-94}{77}$	$\frac{30-250}{130}$	$\frac{130-930}{506}$	$\frac{2-130}{46}$
Протерозойская Ладожская структура Proterozoic Ladoga structure					
Жильный кварц Veined quartz	$\frac{82-6500}{1186}$	$\frac{7,3-1500}{754}$	$\frac{12-2300}{1156}$	$\frac{11-180}{95}$	$\frac{12-120}{66}$
Пегматитовый кварц Pegmatitic quartz	$\frac{66-2000}{719}$	$\frac{7,7-41}{22}$	$\frac{20-65}{41}$	$\frac{11-280}{102}$	$\frac{5-13}{8}$

Примечание. Анализы выполнены с использованием атомно-абсорбционного метода на спектрометре AAS в лабораториях Tatsumori Co (Япония) и Analytica Ab (Швеция). В числителе – вариации содержания, в знаменателе – среднее значение.

Note. Analyses were carried out by the atomic-absorption spectrophotometer method (AAS) in the laboratories of Tatsumori Co (Japan) and Analytica Ab (Sweden). In nominator – variation limit, in denominator – average meaning.



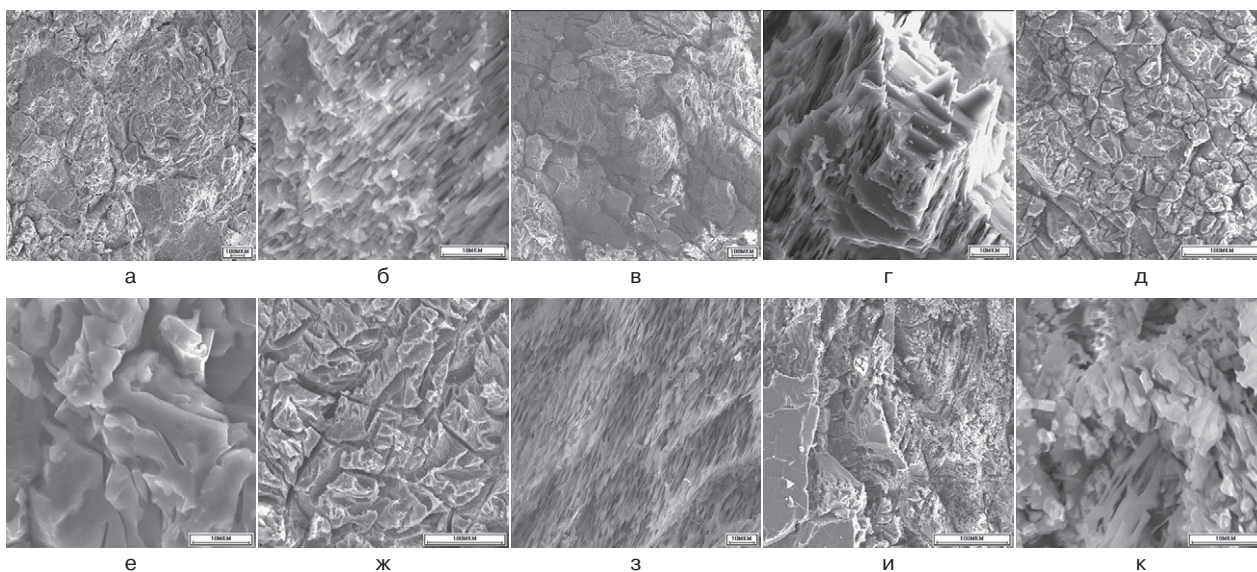


Рис. 7. СЭМ-изображения поверхностей зерен кварца месторождений Кюрьяла (а, б), Фенькина-Лампи (в, г), Меломайс (д, е), Перчатка (ж, з), Майское (и, к):

протравленная, после обработки в HF – а, в, д, ж, и; кристаллиты в зернах кварца – б, г, е, з, к

Fig. 7. SEM images of quartz grains surface of the Kyuryala (a, б), Fenkina Lampi (в, г) Melomais (д, е) Perchatka (ж, з), Maiskoe (и, к) deposits:

etched, after processing in HF – а, в, д, ж, и; crystallites in quartz grains – б, г, е, з, к

дефектности, разной ориентации относительно друг друга и определенных свойств. Установлено, что мелкозернистое строение кварца отвечает высокой скорости его кристаллизации, а крупнозернистое, напротив, характеризует медленно меняющиеся, стабильные условия минералообразования. Одинаковая степень дефектности кварцевых микроблоков свойственна одностадийным процессам их образования. Напротив, появление микроблоков различной степени дефектности указывает на многостадийный характер формирования кварцевого тела и т. д.

Методом просвечивающей электронной микроскопии показано, что строение кварца имеет ярко выраженную зональность [Раков, Дубинчук, 2009]. Установлено, что реальная кристаллическая структура минерала напоминает слоеный пирог. Области кристаллического кварца в нем чередуются с областями дефектной, практически аморфной структуры, обогащенной примесями. Размеры каждой из областей могут варьировать от 5 до нескольких десятков нанометров и более. Области кристаллического кварца были названы кристаллитами, а аморфного – демпферными зонами. Основная часть кристаллитов представляет собой элементарные, наиболее чистые и имеющие совершенную кристаллическую структуру микроблоки кварца. Изучение методом РЭМ

формы и взаимного расположения кристаллитов (рис. 7) дает возможность получать генетически значимую информацию.

Анализ образцов кварца из месторождения керамических пегматитов Кюрьяла свидетельствует о его образовании из коллоидных систем. В них кристаллизация может протекать спонтанно с образованием зерен кварца различной формы и ориентации. На рис. 7 (а) прослеживаются контуры первичных зерен, имеющие сравнительно большие размеры. Внутри первичных зерен видны очертания более мелких зерен, связанных с процессом перекристаллизации, протекавшим в условиях медленно меняющейся термодинамической обстановки. На это указывают форма, размеры кристаллитов и картина их распределения, соответствующие процессу равномерно развивающейся перекристаллизации. Температуры процессов образования и перекристаллизации кварца высокие. В таких условиях может происходить интенсивная дифференциация примесей в объеме минерала и появляются демпферные зоны (рис. 7, б).

Образование кварца на месторождении Фенькина-Лампи (рис. 7, в, г) протекало в совершенно иной термодинамической обстановке [Скамницкая и др., 2013]. Кристаллиты в нем гораздо крупнее и разориентированы в пространстве. Вытравленные демпферные

зоны также не имеют какой-либо упорядоченной формы. Такое взаимоотношение кристаллитов и демпферных зон характерно для кварца, образованного в условиях низких давлений и температур.

Наблюдаемые явления на месторождениях Кюрьяла и Фенькина-Лампи характерны и для месторождения Меломайс (рис. 7, д, е). С одной стороны, в кварце присутствуют мелкие кристаллиты, имеющие одинаковую ориентацию (левая нижняя часть рис. 7, д), с другой – крупные разориентированные кристаллиты (правая верхняя часть рис. 7, д). Это свидетельствует о том, что кварц, образованный при стабильных РТ-условиях, затем подвергся влиянию вторичных низкотемпературных процессов.

Несколько иная природа образования кварца отмечается для месторождения Перчатка. В этом кварце после обработки в HF не прослеживаются очертания отдельных кварцевых зерен (рис. 7, ж, з). Следы травления имеют вид борозд на поверхности кварца. Подобный факт позволяет предположить, что данный кварц образовался не из геля, а из истинных растворов, что может быть вызвано недостаточно высоким содержанием двуоксида кремния в минералообразующем растворе, и это создало благоприятную обстановку для монотонного роста крупных и хорошо ориентированных в пространстве микроблоков кварца. Характер распределения и форма кристаллитов показывают, что процесс кристаллизации протекал при стабильных РТ-условиях и высокой температуре (рис. 7, з).

Кварц месторождения Майское имеет трудную для интерпретации картину распределения микроблоков кварца (рис. 7, и) и кристаллитов (рис. 7, к). При их анализе обнаруживается наложение друг на друга целого ряда процессов при отсутствии доминирующего влияния какого-либо из них. Анализ условий образования жильного кварца месторождения Майское показал, что многоэтапность формирования кварца в условиях невысоких температур (350–300 °С), а также влияние метасоматической переработки на более поздних стадиях при общем снижении температур (до 220 °С) привели к перекристаллизации с образованием химически чистого кварца с высоким индексом кристалличности, который варьирует от 7,4 до 8, что говорит о высокой однородности внутреннего строения [Раков, 2006].

Полученные результаты имеют важное технологическое значение. Они показывают, что по виду кристаллитов можно прогнозировать чистоту конечного продукта, получаемую при

обогащении кварцевого сырья. Чем меньше размеры кристаллитов и демпферных зон, тем чище может оказаться конечный продукт.

#### *Качество кварцевых концентратов*

Этот путь к итоговым результатам исследований последних десятилетий проходил поэтапно. Важное место было определено технологическим работам. В табл. 3 приведена характеристика кварцевых концентратов глубокого обогащения, полученных из природного кварцевого сырья наиболее значимых объектов Карело-Кольского региона в сравнении с эталонным кварцевым продуктом IOTA-STD, что позволяет дать качественную оценку изученных объектов на предварительной стадии.

Преимущества использованных приемов оценки исходного сырья и технологий очистки кварца опробованы на примере способов оценки качества исходного сырья и технологии обогащения на пробах природного кварца объектов Перчатка, Меломайс, Рухнаволок и др. К этому можно добавить, что оценены как традиционные, так и прочие виды кварцевого сырья с использованием новейших методик в геолого-технологическом изучении кварца.

Благодаря работе сотрудников ИГ КарНЦ РАН совместно с коллегами из других организаций страны (ВИМС, ИГЕМ РАН, ИГ КомиНЦ УрО РАН, ГИ КНЦ РАН, ЦНИИГеолнеруд, Центр-кварц) внесен значительный научный вклад в оценку кварцевого сырья Карело-Кольской кварценозной провинции России на современном уровне. Результаты многолетних исследований института могут быть определены в следующем обобщенном виде:

– оценены традиционные и нетрадиционные для Карело-Кольского региона виды кварцевого сырья с использованием новейших методик в области геолого-технологического изучения кварца [Shchiptsov, 1993; Shchiptsov et al., 1997, 1999, 2014a, b; Родионов, Щипцов, 2000; Щипцов и др., 2001, 2010; Данилевская и др., 2004, 2012; Данилевская, 2008, 2012a, б, в; Светова и др., 2012, 2014, 2019; Скамницкая, Бубнова, 2014; Раков и др., 2015, 2017; Светова, Шанина, 2019 и др.];

– разработанный метод технологического и эффективного способа оценки качества кварцевого сырья позволяет достоверно, на предварительной стадии оценки прогнозировать качество кварцевого сырья и направления его использования. Техническим результатом предлагаемого способа является повышение точности и экспрессности, а также упрощение процесса оценки качества кварцевого сы-

Таблица 3. Содержание элементов-примесей в кварцевых концентратах глубокого обогащения из кварцевого сырья месторождений и проявлений Карельского региона, ppm

Объект Subject	Fe	Ti	Al	Mn	Mg	Ca	K	Na	Zr	Sr	Zn	B	Ba	Ni	Cr	Cu	Li	Ge	P	Co	Сумма
<b>ЮТА-STD</b>	<b>0,23</b>	<b>1,3</b>	<b>16,2</b>	<b>&lt;0,05</b>	<b>&lt;0,05</b>	<b>0,5</b>	<b>0,60</b>	<b>0,9</b>	<b>1,3</b>	-	-	-	<b>0,08</b>	<b>&lt;0,05</b>	<b>&lt;0,05</b>	<b>&lt;0,05</b>	<b>0,90</b>	-	<b>0,10</b>	-	<b>18,8</b>
Карелия Karelia																					
Ружаволок Rukhnavolok	0,64	2,9	13,0	-	0,01	0,002	0,1	3,6	-	0,1	0,03	0,04	0,11	0,023	0	0	4,1	0,23	0,1	0,01	24,9
Степаново озеро Stepanovo Lake	0,5	3,9	35,0	0,04	0,23	0,6	0,05	1,0	0,05	0,09	0,04	0,21	0,02	0,01	0,03	0,06	4,1	0,7	0,2	0,01	49,5
Меломайс Melomais	0,8	4,9	17,0	0,01	0,36	1,5	0,63	2,6	0,13	0,13	0,01	0,07	0,13	0,01	0,024	0,045	0,4	0,11	0,1	0,012	31,8
Фенькина-Лампи Fenkina-Lampi	0,74	0,15	20	0,25	0,49	11,0	0,04	47	0,04	0,2	-	0,37	0,62	0,013	0,012	0,03	0,35	0,3	0,2	0,01	95,9
Майское Maiskoe	0,33	0,2	5,8	0,01	0,2	2,2	1,9	10,	0,02	0,08	-	0,15	0,13	<0,01	<0,01	0,013	0,14	0,18	<0,1	<0,01	21,0
Кварц слюдяных отвалов Quartz of mica dumps	0,63	4,8	42	0,02	0,22	-	≤0,05	6,8	≤0,01	≤0,01	-	0,9	-	≤0,01	≤0,01	1,1	0,9	-	≤0,2	≤0,01	42,3
Кольский полуостров Kola Peninsula																					
Перчатка Perchatka	2,1	0,4	11,0	0,064	0,05	12,0	1,0	1,0	0,02	0,45	0,025	0,31	0,01	0,02	0,01	0,13	2	0,5	0,1	-	30,8
Большие Кейвы, уч. Подманюк Bolshie Keivy Podmanjuk	1,68	3,5	19,0	0,015	1,1	0,29	0,87	1,2	0,04	-	0,02	0,12	0,03	0,024	0,09	0,01	0,28	-	0,1	-	28,4
Большие Кейвы, уч. Ельек Bolshie Keivy El'ek	0,5	6,5	19,5	0,01	0,12	0,59	0,8	0,6	0,01	-	0,034	0,9	0,031	0,01	0,01	0,012	2,6	-	0,1	-	32,3

Примечание. Элементный состав определяется методом ICP-AES в НИЦ «Курчатовский институт» (Москва). «-» – элемент не определялся.  
Note. Elemental composition was determined by ICP-AES method in the SIC «Kurchatov Institute» (Moscow). «-» – element was not determined.

рья [Раков, Дубинчук, 2009; Скамницкая и др., 2014, 2018; Shchiptsov et al., 2015; Раков и др., 2016 и др.];

– запатентованный способ очистки кварца является более продуктивным за счет интенсификации процесса очистки кварца от примесей, снижения энергоемкости, длительности, упрощения технологии обогащения, обеспечения высокой экологичности, что позволяет отнести его к высокотехнологичным, экологически безопасным и энергосберегающим технологиям [Данилевская, Скамницкая, 2007; Скамницкая и др., 2013, 2016; Gorbunova et al., 2015];

– полученные результаты могут стать фундаментальным аргументом в пользу расширения минерально-сырьевой базы кварцевого сырья и повышения коэффициента использования недр [Данилевская и др., 2004; Голованов и др., 2006; Данилевская, Шпаченко, 2010; Данилевская, Скамницкая, 2010; Раков и др., 2017; Щипцов и др., 2019 и др.].

Проект ИГ КарНЦ РАН «Суперчистый кварц: Карело-Кольская кварценосная провинция России» удостоен специального приза Петербургской международной технической ярмарки и входящей в ее состав выставки «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Hi-Tech) (Санкт-Петербург, март 2017 г.).

## Заключение

Таким образом, можно суммировать, что в процессе многолетних стадийных исследований разработаны новые поисковые признаки обнаружения перспективного кварцевого сырья; оценены как традиционные, так и другие виды кварцевого сырья с использованием новейших методик; обоснованы эффективные инновационные технологии обогащения кварцевого сырья и показана экономическая эффективность – возможные варианты продвижения на данной стадии проекта: трансферт технологии или продажа патентов.

*Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (тема НИР № АААА-А18-118020290175-2).*

## Литература

*Геология рудных районов Мурманской области / Ред. В. И. Пожиленко, Б. В. Гавриленко, Д. В. Жиров, С. В. Жабин. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 359 с.*

*Голованов Ю. Б., Михайлов В. П., Щипцов В. В., Родионов В. С. Кварцевое сырье // Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2. Петрозаводск: Карелия, 2006. С. 55–69.*

*Данилевская Л. А. Карело-Кольская кварценосная провинция // Труды КарНЦ РАН. 2012а. № 3. С. 37–56.*

*Данилевская Л. А. Кварцевое сырье Кольского полуострова (обзор фондовых материалов и перспективы) // Проблемы рудогенеза докембрийских щитов: Тр. всерос. науч. конф. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. С. 29–33.*

*Данилевская Л. А. Потенциал Кольского полуострова на кварцевое сырье // Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона: Тр. IX Всерос. Ферсмановской науч. сессии. Апатиты, 2012б. С. 26–28.*

*Данилевская Л. А. Потенциал Республики Карелия в освоении ресурсов кварцевого сырья // Горный журнал. 2012в. № 5. С. 22–25.*

*Данилевская Л. А., Гаранжа А. В. Месторождение жильного кварца Фенькина-Лампи: геолого-минералогические аспекты формирования, типоморфные свойства и оценка качества // Геолого-технологические исследования индустриальных минералов Фенноскандии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 29–38.*

*Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С. Месторождение жильного кварца Перчатка: история освоения, геолого-минералогические особенности, новые подходы к оценке сырья // Геология и полезные ископаемые Кольского п-ова: Тр. VII Всерос. Ферсмановской науч. сессии (Апатиты, 2–5 мая 2010 г.). Апатиты: К&М, 2010. С. 39–44.*

*Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С. Микропримеси в кварце и их влияние на степень очистки при обогащении // Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья: Сб. науч. статей по мат. II Рос. семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 128–135.*

*Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. Предварительные данные минералого-технологических исследований кварца золоторудного месторождения Майское (Северная Карелия) // Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии: Сб. статей по матер. докл. VII Рос. семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 117–122.*

*Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С., Светов С. А. Кварцевая галька как нетрадиционный тип кварцевого сырья: возможности очистки и использования // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения – 2012): Матер. докл. междунар. совещания. Петрозаводск, 2012. С. 250–253.*

*Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. Кварцевое сырье Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 226 с.*

*Данилевская Л. А., Шпаченко А. К. Особенности жильного гранулированного кварца Карело-Коль-*

ского региона // Современная минералогия от теории к практике: Матер. XI съезда РМО. СПб., 2010. С. 332–334.

Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. В. Я. Горьковец, Н. В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 322 с.

Липовский Ю. О. Отчет Кольской партии СПО «Сверкварцсамоцветы» «Перспективная оценка кварцево-жильных полей и участков Мурманской области на сырье для плавки кварцевого стекла» по результатам работ, проведенных в 1988–90 гг.». ФГУ. 1991 г.

Раков Л. Т. Механизмы изоморфизма в кварце // Геохимия. 2006. № 10. С. 1085–1096.

Раков Л. Т., Дубинчук В. Т. Новые подходы к проведению оценки качества кварцевого сырья // Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов: Сб. науч. статей по матер. Рос. семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 78–82.

Раков Л. Т., Дубинчук В. Т., Щипцов В. В., Скамницкая Л. С. Подвижные примеси в кварце Карело-Кольского региона // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 10. С. 100–118. doi: 10.17076/geo377

Раков Л. Т., Скамницкая Л. С., Дубинчук В. Т., Ружицкий В. В. Технологические свойства кварца Карело-Кольского региона сырья // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии: Сб. статей по матер. докл. Рос. семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 96–104.

Раков Л. Т., Щипцов В. В., Дубинчук В. Т., Скамницкая Л. С. Кварцевое сырье Карело-Кольского региона: о природе образования и генетическом значении субмикроскопических структурных неоднородностей в кварце // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 7. С. 164–180. doi: 10.17076/geo142

Родионов В. С., Щипцов В. В. Отчет о прогнозно-минерагеническом изучении Республики Карелия в масштабе 1:1000000 с целью выявления объектов, перспективных на минеральное сырье для производства специальных кварцевых изделий (1995–2000 гг.). Кн. 1–4. Петрозаводск, 2000. (КарТФГИ).

Салтыков Ю. М. и др. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследования кварца Карело-Кольской провинции с целью выявления запасов высокочистого кварцевого сырья для промышленности кварцевых изделий, оптического стекла, синтеза искусственных кристаллов и кварцевой керамики». 1990. (КарТФГИ).

Светова Е. Н., Светов С. А., Данилевская Л. А. Редкие и редкоземельные элементы в кварце как индикаторы условий минералообразования // Труды КарНЦ РАН. 2012. № 3. С. 137–145.

Светова Е. Н., Скамницкая Л. С., Светов С. А. Минералого-геохимическая характеристика палеопротерозойских кварцевых конгломератов как нетрадиционного источника кварцевого сырья // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья: Сб. науч. ст. по матер. VIII Рос. семинара по тех-

нол. минерал. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. С. 132–141.

Светова Е. Н., Скамницкая Л. С., Шанина С. Н. Содержание воды в слабопрозрачном жильном кварце месторождения Фенькина-Лампи (Карелия) как критерий его качества // Разведка и охрана недр. 2019. № 10. С. 35–40.

Светова Е. Н., Шанина С. Н. Анализ газово-жидких включений в жильном кварце месторождения Фенькина-Лампи методом газовой хроматографии // Минералого-технологическая оценка новых видов минерального сырья: Сб. ст. по матер. XII Рос. семинара по технол. минерал. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2019. С. 93–97. doi: 10.17076/tm13\_14

Скамницкая Л. С., Данилевская Л. А., Раков Л. Т., Дубинчук В. Т. Способ обогащения природного кварцевого сырья. Патент РФ № 2483024. 2013.

Скамницкая Л. С., Данилевская Л. А., Щипцов В. В., Раков Л. Т., Дубинчук В. Т. Способ оценки качества кварцевого сырья. Патент РФ № 2525681. 2014.

Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. Влияние способа термообработки на физико-механические свойства кварца месторождения Майское // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья: Сб. науч. ст. по матер. VIII Рос. семинара по технол. минерал. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. С. 124–132.

Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П., Светов С. А. Технологическая минералогия высококремнистых осадочных пород Карелии – нетрадиционного кварц-полевшпатового сырья // Обогащение руд. 2016. С. 35–42. doi: 10.17580/or.2016.04.06

Скамницкая Л. С., Раков Л. Т., Дубинчук В. Т., Бубнова Т. П. Метод опережающей диагностики обогатимости кварца // Разведка и охрана недр. 2018. № 10. С. 62–66.

Щипцов В. В., Данилевская Л. А., Гаранжа А. В., Родионов В. С. Прогнозно-минерагеническая оценка кварценоности Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 4. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 71–78.

Щипцов В. В., Раков Л. Т., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. Минералого-технологические критерии оценки перспективности кварцевого сырья Карело-Кольской кварценозной провинции // Геология и минерагения Северо-Востока России: Матер. XVII геологического съезда Республики Коми. Т. 3. Сыктывкар, 2019. С. 269–272.

Щипцов В. В., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П., Данилевская Л. А. Роль геологических, минералогических и технологических исследований Института геологии КарНЦ РАН в оценке потенциала минерально-сырьевой базы Республики Карелия // Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья: Сб. статей. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 37–55.

Щипцов В. В. Промышленные минералы Карелии // Горный журнал. 2019. № 3. С. 16–20. doi: 10.17580/gzh.2019.03.03

Blankenburg H-J., Götze J., Schultz H. Quarzrohstoffe. Leipzig-Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoff-industrie, 1994. 296 p.

Flook R. Silica and high purity quartz // *Industrial Minerals*. 2013. 25 p.

Gorbunova E. V., Chertov A. N., Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P. A selective factors searching technique for mineral raw materials enrichment by optical sorting method // SGEM2015 Conf. Proceed. Sofia, Bulgaria, 2015. Book 1, vol. 1, Section Geology. P. 561–568. doi: 10.5593/SGEM2015/B11/S4.071

Quartz: Deposits, mineralogy and analytics / Eds. Jens Götze & Robert Möckel. Springer Geology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 355 p.

Shchiptsov V. V. Quartz // *Precambrian industrial minerals of Karelia*. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1993. P. 31–32.

Shchiptsov V. V., Astala J., Skamnitskaya L. S. Quartz of Karelia (Russia) // *Mineral Deposits* / H. Papunen (ed.). Rotterdam: Balkema, 1997. P. 751–753.

Shchiptsov V. V., Scamnitskaya L. S., Bubnova T. P. Geological and economic evaluation of quartz from the Republic of Karelia, Russia // SGEM2014 Conf. Proceed. Sofia, Bulgaria, 2014a. Vol. 1. P. 153–160. doi: 10.5593/SGEM2014/B11/S1.019

Shchiptsov V. V., Scamnitskaya L. S., Garanzha A. V., Danilevskaya L. A., Rodionov V. S., Astala J., Iwasaki H., Iwasaki F. Assessment of quartz occurrences in the Republic of Karelia and their potential for pure quartz product // *Industrial minerals: deposits and new developments in Fennoscandia*. Petrozavodsk, 1999. P. 63–67.

## References

Danilevskaya L. A., Skamnitskaya L. S. Mestorozhdenie zhil'nogo kvartsa Perchatka: istoriya osvoeniya, geologo-mineralogicheskie osobennosti, novye podkhody k otsenke syr'ya [Perchatka vein quartz deposit: development history, geological-mineralogical features, and new approaches to raw materials assessment]. *Geol. i poleznye iskopaemye Kol'skogo poluostrova: Tr. VII Vseros. Fersmanovskoi nauch. sessii (Apatity, 2–5 may 2010)* [Geol. and mineralogy of the Kola Peninsula: Proceed. VII All-Russ. Fersman sci. session (Apatity, May 2–5, 2010)]. Apatity: K&M, 2010. P. 39–44.

Danilevskaya L. A. Karelo-Kol'skaya kvartsenosnaya provintsiya [Karelian-Kola quartziferous province]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2012a. No. 3. P. 37–56.

Danilevskaya L. A. Kvartsevoe syr'e Kol'skogo poluostrova (obzor fondovykh materialov i perspektivy) [Quartz raw materials of the Kola Peninsula: archive materials review and prospects]. *Probl. rudogeneza dokembriiskikh shchitov: Tr. vseros. nauch. konf.* [Problems of the Precambrian shields orogenesis: Proceed. All-Russ. sci. conf.] Apatity: KNTs RAN, 2008. P. 29–33.

Danilevskaya L. A. Potentsial Kol'skogo poluostrova na kvartsevoe syr'e [Potential of the Kola Peninsula for quartz raw materials]. *Geol. i strategicheskie poleznye iskopaemye Kol'skogo regiona: Tr. IX Vseros. Fersmanovskoi nauch. sessii* [Geol. and strategic raw material of the Kola region: Proceed. IX All-Russ. Fersman sci. session]. Apatity, 2012b. P. 26–28.

Danilevskaya L. A. Potentsial Respubliki Kareliya v osvoenii resursov kvartsevogo syr'ya [Potential of the Republic of Karelia in developing quartz raw material]. *Gornyi zhurn.* [Mining J.]. 2012b. No. 5. P. 22–25.

Shchiptsov V. V., Scamnitskaya L. S., Voytekhovskiy Yu. L., Bubnova T. P., Dubinchuk V. T., Rakov L. T. Geological and mineralogical-technological appraisal of quartz as a raw material from the Karelia-Kola quartz-bearing province, a new promising region of Russia // *Abs. and Proceed. of the Geol. Society of Norway. The Arctic Days 2014. Norsk Geologisk Forening c/o Norges geologiske undersøkelse N-7491*. Trondheim, 2014b. P. 80–81.

Shchiptsov V. V., Scamnitskaya L. S., Rakov L. T., Dubinchuk V. T. Genetic value and the technological importance of structural not uniformity of submicroscopic level in quartz // SGEM2015 Conf. Proceed. Sofia, Bulgaria, 2015. Book 1, vol. 1, Section Geology. P. 395–402. doi: 10.5593/SGEM2015/B11/S1.050

*The economics of quartz* // Roskill Information Services Ltd. London, 1992. 56 p.

Weil J. A. A review of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz // *Phys. Chem. Mineral.* 1984. No. 10. P. 149–165.

Weil J. A. A review of the EPR spectroscopy of the point defects in  $\sigma$ -quartz the decade 1982–1992 // Helms C. R., Deal B. E. (eds). *Physics and Chemistry of SiO<sub>2</sub> and the Si-SiO interface 2*. New York: Plenum Press, 1993. P. 131–144.

Поступила в редакцию 18.05.2020

Danilevskaya L. A., Garanzha A. V. Mestorozhdenie zhil'nogo kvartsa Fen'kina-Lampi: geologo-mineralogicheskie aspekty formirovaniya, tipomorfnye svoystva i otsenka kachestva [Fen'kina-Lampi vein quartz deposit: geological-mineralogical aspects of formation, polymorphic features and quality control]. *Geologo-tekhno. issled. industrial'nykh mineralov Fennoskandii* [Geological-mineralogical investigation of Fennoscandian industrial minerals]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2003. P. 29–38.

Danilevskaya L. A., Skamnitskaya L. S. Mikroprime-si v kvartse i ikh vliyanie na stepen' ochistki pri obogashchenii [Impurity in quartz and their effect to enrichments degree]. *Znachenie issled. tekhnol. mineralogii v reshenii zadach kompleksnogo osvoeniya mineral'nogo syr'ya: Sb. nauch. statei po mater. II Ros. seminar po tekhnol. mineralogii* [The importance of technol. mineralogy research in solving the problems of integrated development of mineral raw materials: Proceed. II Russ. seminar on technological mineralogy]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. P. 128–135.

Danilevskaya L. A., Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P. Predvaritel'nye dannye mineralogo-tekhnologicheskikh issledovaniy kvartsa zolotorudnogo mestorozhdeniya Maiskoe (Severnaya Kareliya) [Preliminary data from mineralogical and technological studies of quartz of the Mayskoye gold-ore deposit (North Karelia)]. *Prognoznaya otsenka tekhnol. svoystv poleznykh iskopaemykh metodami prikladnoi mineralogii: Sb. statei po mater. dokl. VII Ros. seminar po tekhnol. mineralogii* [Forecast assessment of technol. properties of raw materials by applied mineralogy methods: Proceed.

VII Russ. seminar on technol. mineralogy]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. P. 117–122.

Danilevskaya L. A., Skamnitskaya L. S., Svetov S. A. Kvarcsevaya gal'ka kak netraditsionnyi tip kvartsevogo syr'ya: vozmozhnosti ochistki i ispol'zovaniya [Quartz pebbles as nonconventional type of quartz raw material]. *Sovr. metody tekhnol. mineralogii v protsessakh kompleksnoi i glubokoi pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2012): mater. dokl. mezhd. soveshch.* [Modern methods of technol. mineralogy in the processes of complex and deep processing of mineral raw materials (The Plaksinsky readings – 2012): Proceed. int. meeting]. Petrozavodsk, 2012. P. 250–253.

Danilevskaya L. A., Skamnitskaya L. S., Shchiptsov V. V. Kvarcsevoe syr'e Karelii [Karelian quartz raw material]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2004. 226 p.

Danilevskaya L. A., Shpachenko A. K. Osobennosti zhil'nogo granulirovannogo kvartsa Karelo-Kol'skogo regiona [Features of veined granular quartz of the Karelian-Kola region]. *Sovr. mineralogiya ot teorii k praktike: mater. XI s'ezda RMO* [Modern mineralogy from theory to practice: Proceed. XI Congress RMS]. St. Petersburg, 2010. P. 332–334.

Geologiya rudnykh raionov Murmanskoi oblasti [Geology of ore areas of the Murmansk Region]. Eds. V. I. Pozhilenko, B. V. Garilenko, D. V. Zhironov, S. V. Zhabin. Apatity: KNTs RAN, 2002. 359 p.

Golovanov Yu. B., Mikhailov V. P., Shchiptsov V. V., Rodionov V. S. Kvarcsevoe syr'e [Quartz raw material]. *Mineral'no-syr'evaya baza Respubliki Kareliya* [Raw material base of the Republic of Karelia]. Book 2. Petrozavodsk: Kareliya, 2006. P. 55–69.

Kostomukshskii rudnyi raion (geologiya, glubinnoe stroenie i minerageniya) [Kostomuksha mining region: geology, deep structure, and minerageny]. Eds. V. Ya. Gor'kovets, N. V. Sharov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. 322 p.

Lipovskii Yu. O. Otchet Kol'skoi partii SPO "Severkvartssamotsvety" "Perspektivnaya otsenka kvartsevo-zhil'nykh polei i uchastkov Murmanskoi oblasti na syr'e dlya plavki kvartsevogo stekla" po rezul'tatam rabot, provedennykh v 1988–90 gg." [Report of the Kola party of the NPA Severkvartssamotsvety *Prospective assessment of quartz-vein fields and sections of the Murmansk Region on raw materials for melting quartz glass* based on the results of work carried out in 1988–90]. FGU. 1991.

Rakov L. T. Mechanism of isomorphic substitution in quartz. *Geochem. Int.* 2006. Vol. 44, no. 10. P. 1004–1014.

Rakov L. T., Dubinchuk V. T. Novye podkhody k provedeniyu otsenki kachestva kvartsevogo syr'ya [New approaches to assessing the quartz raw materials grade]. *Novye metody tekhnol. mineralogii pri otsenke rud metallov i promyshlennykh mineralov: Sb. statei po mater. Ros. seminara po tekhnol. mineral.* [New methods of technological mineralogy in the evaluation of ores and industrial minerals: Proceed. Russ. seminar on technol. mineralogy]. Petrozavodsk, 2009. P. 78–82.

Rakov L. T., Dubinchuk V. T., Shchiptsov V. V., Skamnitskaya L. S. Podvizhnye primesi v kvartse Karelo-Kolskogo regiona [Mobile mixtures in quartz from the Karelian-Kola region]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans.

KarRC RAS]. 2016. No. 10. P. 100–118. doi: 10.17076/geo377

Rakov L. T., Skamnitskaya L. S., Dubinchuk V. T., Ruzhitskii V. V. Tekhnologicheskie svoystva kvartsa Karelo-Kol'skogo regiona syr'ya [Technological properties of quartz of the Karelo-Kola region]. *Rezul'taty mezhdistsiplinarnykh issled. v tekhnol. mineralogii: Sb. statei po mater. Ros. seminara po tekhnol. mineral.* [Results of interdisciplinary researchers in technol. mineralogy: Proceed. Russ. seminar on technol. mineralogy]. Petrozavodsk, 2017. P. 96–104.

Rakov L. T., Shchiptsov V. V., Dubinchuk V. T., Skamnitskaya L. S. Kvarcsevoe syr'e Karelo-Kol'skogo regiona: o prirode obrazovaniya i geneticheskome znachenii submikroskopicheskikh strukturnykh neodnorodnostei v kvartse [Quartz of the Karelian-Kola region as a raw material: on the origins and genetic implications of submicroscopic structural heterogeneities in quartz]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2015. No. 7. P. 164–180. doi: 10.17076/geo142

Rodionov V. S., Shchiptsov V. V. Otchet o prognozno-mineragenicheskom izuchenii Respubliki Kareliya v masshtabe 1:1000000 s tsel'yu vyyavleniya ob'ektov, perspektivnykh na mineral'noe syr'e dlya proizvodstva spetsial'nykh kvartsevyykh izdelii [Report on the forecast mineragenetic analysis of the Republic of Karelia on a scale of 1:1000000 in order to identify objects promising for mineral raw materials for the production of special quartz products]. Books 1–4. Petrozavodsk, 2000. (KarTFGI).

Saltykov Yu. M. et al. Otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote "Issledovaniya kvartsa Karelo-Kol'skoi provintsii s tsel'yu vyyavleniya zapasov vysokochistogo kvartsevogo syr'ya dlya promyshlennosti kvartsevyykh izdelii, opticheskogo stekla, sinteza iskusstvennykh kristallov i kvartsevoi keramiki" [Report on research work *Studies of quartz in the Karelian-Kola region in order to identify stocks of high-purity quartz raw materials for the industry of quartz products, optical glass, the synthesis of artificial crystals and quartz ceramics*]. 1990. (KarTFGI).

Shchiptsov V. V., Danilevskaya L. A., Garanzha A. V., Rodionov V. S. Prognozno-mineragenicheskaya otsenka kvartsenosti Karelii [Forecast mineragenetic assessment of Karelian quartz]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Minerals of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2001. No. 4. P. 71–78.

Shchiptsov V. V., Rakov L. T., Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P. Mineralogo-tekhnologicheskie kriterii otsenki perspektivnosti kvartsevogo syr'ya Karelo-Kol'skoi kvartsenosnoi provintsii [Mineralogical and technological criteria for assessing the prospects of quartz raw materials of the Karelian-Kola quartziferous province]. *Geol. i minerageniya Severo-Vostoka Rossii: mat-ly XVII geol. s'ezda Respubliki Komi* [Geol. and Minerageny of the North-East of Russia: Proceed. XVII geol. congress of the Republic of Komi]. No. 3. Syktyvkar, 2019. P. 269–272.

Shchiptsov V. V., Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P., Danilevskaya L. A. Rol' geologicheskikh, mineralogicheskikh i tekhnologicheskikh issledovaniy Instituta geologii KarNTs RAN v otsenke potentsiala mineral'no-syr'evoi bazy Respubliki Kareliya [The role of geological, minera-

logical and technological research of the Institute of Geology of KarSC RAS in assessing the potential of the mineral resource base of the Republic of Karelia]. *Tekhnol. mineralogiya, metody pererabotki mineral'nogo syr'ya: Sb. st.* [Technol. mineralogy, methods of processing mineral raw materials: Proceed.]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. P. 37–55.

Shchiptsov V. V. Promyshlennyye mineraly Karelii [Industrial minerals of Karelia]. *Gornyi zhurn.* [Mining J.]. 2019. No. 3. P. 16–20. doi: 10.17580/gzh.2019.03.03

Skamnitskaya L. S., Danilevskaya L. A., Rakov L. T., Dubinchuk V. T. Sposob obogashcheniya prirodno-go kvartsevogo syr'ya [A method for enriching natural quartz raw materials]. Russian Patent No 2483024 (Publication of RU2483024C2). 2013.

Skamnitskaya L. S., Danilevskaya L. A., Shchiptsov V. V., Rakov L. T., Dubinchuk V. T. Sposob otsenki kachestva kvartsevogo syr'ya [A method for grade assessing of quartz raw materials]. Russian Patent No 2525681 (Publication of RU2525681C2). 2014.

Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P. Vliyanie sposoba termoobrabotki na fiziko-mekhanicheskie svoystva kvartsa mestorozhdeniya Maiskoe [The term treatment effect to physics and mechanics properties of the Maiskoe quartz deposit]. *Tekhnol. mineralogiya v optimizatsii protsessov rudopodgotovki i obogashcheniya mineral'nogo syr'ya: Sb. nauchn. st. po mat. VIII Ros. seminar po tekhnol. mineral.* [Technol. mineralogy in optimizing the processes of ore preparation and mineral processing: Proceed. VIII Russ. seminar on technol. mineralogy]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2014. P. 124–132.

Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P., Svetov S. A. Tekhnologicheskaya mineralogiya vysokokremnistykh osadochnykh porod Karelii – netraditsionnogo kvartspolevoshpatovogo syr'ya [Process mineralogy of Karelian high-silica sedimentary rocks – a nonconventional source of quartzfeldspathic mineral material]. *Obogashchenie rud* [Mineral Processing J.]. 2016. No. 4. P. 35–42. doi: 10.17580/or.2016.04.06

Skamnitskaya L. S., Rakov L. T., Dubinchuk V. T., Bubnova T. P. Metod operezhayushchei diagnostiki obogatimosti kvartsa [A diagnostic method of quartz enrichment]. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and Protection of Mineral Resources]. 2018. No. 10. P. 62–66.

Svetova E. N., Svetov S. A., Danilevskaya L. A. Redkie i redkozemel'nye elementy v kvartse kak indikator uslovii mineraloobrazovaniya [Rare and rare earth elements in quartz as indicators of mineralogenesis]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2012. No. 3. P. 137–145.

Svetova E. N., Skamnitskaya L. S., Svetov S. A. Mineralogo-geokhimicheskaya kharakteristika paleoproterozoiskikh kvartsevyykh konglomeratov kak netraditsionnogo istochnika kvartsevogo syr'ya [Mineralogical and geochemical characteristics of the Paleoproterozoic quartz conglomerates as a nonconventional source of quartz raw materials]. *Tekhnol. mineralogiya v optimizatsii protsessov rudopodgotovki i obogashcheniya mineral'nogo syr'ya: Sb. st. po mater. VIII Ros. seminar po tekhn. mineral.* [Technol. mineralogy in the optimization of ore preparation and mineral processing: Proceed. VIII Russ. seminar on technol. mineralogy]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2014. P. 132–141.

Svetova E. N., Skamnitskaya L. S., Shanina S. N. Soderzhanie vody v slaboprozrachnom zhil'nom kvartse mestorozhdeniya Fen'kina-Lampi (Kareliya) kak kriterii ego kachestva [Water content in the weakly transparent vein quartz of the Fenkina-Lampi (Karelia) deposit as the criterion of its grade]. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and Protection of Mineral Resources]. 2019. No. 10. P. 35–40.

Svetova E. N., Shanina S. N. Analiz gazovo-zhidkikh vkluychenii v zhil'nom kvartse mestorozhdeniya Fen'kina-Lampi metodom gazovoi khromatografii [Analysis of fluid inclusions in vein quartz of the Fenkina-Lampi deposit by gas chromatography]. *Mineralogo-tekhnol. otsenka novykh vidov mineral'nogo syr'ya: Sb. statei po mater. XII Ros. seminar po tekhnol. mineral.* [Mineralogical and technol. assessment of new types of mineral products: Proceed. XII Russ. seminar on technol. mineralogy]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2019. P. 93–97. doi: 10.17076/tm13\_14

Blankenburg H.-J., Götze J., Schultz H. Quarzrohstoffe. Leipzig-Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoff-industrie, 1994. 296 p.

Flook R. Silica & High purity quartz. *Industrial Minerals*. 2013. P. 25.

Gorbunova E. V., Chertov A. N., Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P. A selective factors searching technique for mineral raw materials enrichment by optical sorting method. *SGEM2015 Conf. Proceed.* Sofia, Bulgaria, 2015. Book 1, vol. 1, Section Geology. P. 561–568. doi: 10.5593/SGEM2015/B11/S4.071

Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics. Eds. Jens Götze & Robert Möckel. Springer Geology. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 355 p.

Shchiptsov V. V. Quartz. *Precambrian industrial minerals of Karelia*. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1993. P. 31–32.

Shchiptsov V. V., Astala J., Skamnitskaya L. S. Quartz of Karelia (Russia). *Mineral Deposits*. H. Papunen (ed.). Rotterdam: Balkema, 1997. P. 751–753.

Shchiptsov V. V., Scamnitskaya L. S., Bubnova T. P. Geological and economic evaluation of quartz from the Republic of Karelia, Russia. *SGEM2014 Conf. Proceed.* Sofia, Bulgaria, 2014a. Vol. 1. P. 153–160. doi: 10.5593/SGEM2014/B11/S1.019

Shchiptsov V. V., Scamnitskaya L. S., Garanzha A. V., Danilevskaya L. A., Rodionov V. S., Astala J., Iwasaki H., Iwasaki F. Assessment of quartz occurrences the Republic of Karelia and their potential for pure quartz product. *Industrial minerals: deposits & new developments in Fennoscandia*. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1999. P. 63–67.

Shchiptsov V. V., Skamnitskaya L. S., Rakov L. T., Dubinchuk V. T. Genetic value and the technological importance of structural not uniformity of submicroscopic level in quartz. *SGEM2015 Conf. Proceed.* Sofia, Bulgaria, 2015. Book 1, vol. 1, Section Geology. P. 395–402. doi: 10.5593/SGEM2015/B11/S1.050

Shchiptsov V. V., Scamnitskaya L. S., Voytekhovskiy Yu. L., Bubnova T. P., Dubinchuk V. T., Rakov L. T. Geological and mineralogical-technological appraisal of quartz as a raw material from the Karelia-Kola quartz-bearing province, a new promising region of Russia. *Abs. and Proceed. of the Geol. Society of Norway*.



*The Arctic Days 2014.* Norsk Geologisk Forening c/o Norges geologiske undersøkelse N-7491. Trondheim, 2014b. P. 80–81.

*The economics of quartz.* *Roskill Inform. Services* Ltd. London: 1992. 56 p.

Weil J. A. A review of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystal-line quartz. *Phys. Chem. Mineral.* 1984. No. 10. P. 149–165.

Weil J. A. A review of the EPR spectroscopy of the point defects in  $\sigma$ -quartz the decade 1982–1992. C. R. Helms, B. E. Deal (eds). *Physics and Chemistry of SiO<sub>2</sub> and the Si-SiO interface 2.* New York: Plenum Press, 1993. P. 131–144.

Received May 18, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Щипцов Владимир Владимирович

заведующий отделом минерального сырья, д. г.-м. н.  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: vv.shchiptsov@gmail.com  
тел.: +79216240981

### Бубнова Татьяна Петровна

научный сотрудник  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: bubnova@krc.karelia.ru  
тел.: (814) 768092

### Светова Евгения Николаевна

старший научный сотрудник, к. г.-м. н.  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: ensvetova@igkrc.ru, enkotova@rambler.ru  
тел.: +79814015434

### Скамницкая Любовь Степановна

старший научный сотрудник  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: skamnits@krc.karelia.ru  
тел.: (814) 768092

## CONTRIBUTORS:

### Shchiptsov, Vladimir

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: vv.shchiptsov@gmail.com  
tel.: +79216240981

### Bubnova, Tatyana

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: bubnova@krc.karelia.ru  
tel.: (814) 768092

### Svetova, Evgeniya

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: ensvetova@igkrc.ru, enkotova@rambler.ru  
tel.: +79814015434

### Skamnitskaya, Lubov

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: skamnits@krc.karelia.ru  
tel.: (814) 768092

УДК 552.16 + 551.71 (470.22)

## ГЕОЛОГИЯ И ПЕТРОЛОГИЯ ЦОИЗИТИТОВЫХ ПОРОД ГРИДИНСКОГО ЭКЛОГИТСОДЕРЖАЩЕГО КОМПЛЕКСА БЕЛОМОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

О. И. Володичев, Т. И. Кузенко, О. А. Максимов

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

Приводятся новые данные по геологии и петрологии цоизититов – пород, занимающих в Гридинском эклогитсодержащем комплексе Беломорской провинции одинаковое с эклогитами геологическое положение, – в составе обломочного компонента среди разнейсованной гранитоидной матрицы. Реликтовая ассоциация  $Pl_{>82-83} \pm Di$  предполагает анортозитовую природу протолита цоизититов. Прогрессивный тренд метаморфизма включает: 1) стадию образования по основным плагиоклазам белых слюд, представленных мусковитами и фенгитами с содержанием  $Si = 3,15-3,27$  к. ф., и 2) стадию практически полного замещения минералов ранних ассоциаций цоизитами с возрастающим содержанием  $X_{Ps}$  от 0,10 до 0,17. P-T условия прогрессивного тренда от 9 кбар/590 °C до 23,5 кбар/820 °C соответствуют высокобарической амфиболитовой – эклогитовой фациям. P-T условия ретроградных процессов: 1)  $Zo_{0,10}$  – 13 кбар/600 °C; 2)  $Zo_{0,08}$  – 8 кбар/570 °C. Протолит цоизититов – анортозиты, вероятно, являются фрагментами расслоенного массива габбро-анортозитов, примером которых по реликтовым минералогическим особенностям и возрасту могут быть амфиболитизированные полосчатые апо-эклогиты о. Столбиха: возраст эклогитов и цоизититов ~ 2,72 млрд лет, возраст их магматического протолита ~ 2,75 млрд лет. Преобладание в составе обломочного компонента плутонических пород предполагает проявление эклогитового метаморфизма в режиме коллизии. При этом эклогитизированные породы могут быть нижнекоровыми образованиями, эксгумированными в начальной стадии формирования архейской коллизии в декомпрессионном канале, сформировавшемся в процессе образования континентальной трансензионной глубинной зоны.

**Ключевые слова:** Гридинский эклогитсодержащий комплекс; Беломорская провинция; архей; цоизитит; анортозит; эклогит; высокобарический метаморфизм; цоизит; фенгит.

### **O. I. Volodichev, T. I. Kuzenko, O. A. Maksimov. GEOLOGY AND PETROLOGY OF ZOISITITES FROM THE GRIDINO ECLOGITE-BEARING COMPLEX, BELOMORIAN PROVINCE, FENNOSCANDIAN SHIELD**

New data are reported on the geology and petrology of zoisitites, whose geological position in the Gridino eclogite-bearing complex of the Belomorian Province (as part of a clastic component in the foliated granitoid matrix) is similar to that of eclogites. The relict association  $Pl_{>82-83} \pm Di$  suggests an anorthositic origin for the protolith of the zoisitites. The prograde trend of metamorphism comprises: 1) a stage at which white micas (muscovites and phengites with Si concentrations of 3.15–3.27 a. p. f. u) were formed after calcium-rich plagioclase, and 2) a stage at which early association minerals were completely

replaced by zoisites with  $X_{Ps}$  concentrations increasing from 0.10 to 0.17. The P-T conditions of the prograde trend – 9 kbar/590 °C to 23.5 kbar/820 °C – are consistent with high-pressure amphibolite – eclogite facies. The P-T conditions of retrograde processes were: 1)  $Zo_{0.10}$  – 13 kbar/600 °C; 2)  $Zo_{0.08}$  – 8 kbar/570 °C. Anorthosite as the protolith of the zoisitites is assumed to be fragments of a layered gabbro-anorthosite massif similar in relict mineralogo-petrological characteristics and age to amphibolitized striated apoecligites from Stolbikha Island: the eclogites and zoisitites are dated at ~ 2.72 Ga and the age of their magmatic protolith is ~ 2.75 Ga. The predominance of plutonic rocks in the composition of the clastic component suggests an eclogite-facies metamorphic event in a collision regime. Eclogitized rocks could have occurred as lower-crustal material got exhumed at the initial stage of an Archean collision in a decompression channel during the formation of a deep continental transtension zone.

**Keywords:** Gridino eclogite-bearing complex; Belomorian Province; the Archean; zoisite; anorthosite; eclogite; high-pressure metamorphism; zoisite; phengite.

## Введение

Цоизититы – породы, состоящие из цоизита ( $Zo^1$ ) – водного алюмосиликата кальция ромбической сингонии. Его моноклинным полиморфом является клиноцоизит, входящий в группу эпидота [Armbruster et al., 2006]. Вариации состава в группах ромбический цоизит – моноклинные клиноцоизит–эпидот–пистацит характеризуются изовалентным замещением  $Al^{3+} \rightarrow Fe^{3+}$ , обозначаемым мольной фракцией  $X_{Ps} = Fe^{3+}/(Fe^{3+} + Al - 2)$  [Deer et al., 1997]. В цоизитах  $X_{Ps}$  не превышает 0,20, в минералах группы эпидотов  $X_{Ps}$  варьирует в пределах 0–1,0 [Deer et al., 1997]. Содержание  $Fe^{3+}$  ( $X_{Ps}$ ) в системе «цоизит – клиноцоизит», по экспериментальным и эмпирическим данным, зависит от температуры [Enami, Banno, 1980; Prunier, Hewitt, 1985], от температуры и давления [Franz, Selverstone, 1992; Brunsmann et al., 2002].

Минералы цоизитовой и эпидотовой групп, часто сосуществующие, являются стабильными в метаморфических породах в широком спектре P-T условий [Bird, Spieler, 2004; Enami et al., 2004; Franz, Liebscher, 2004; Grapes, Hoskin, 2004; Klemd, 2004; Schmidt, Poli, 2004]. В комплексах пород, метаморфизованных в условиях высоких (HP) и ультравысоких (UHP) давлений, являющихся прямыми индикаторами субдукционных и коллизионных процессов, минералы группы эпидота (Czo – Ep) являются стабильными в HP-комплексах в эпидотовой области фации голубых сланцев [Evans, 1990], в эпидот-амфиболитовой, HP-гранулитовой и в амфиболитовой и эпидотовой областях эклогитовой фации [Enami et al., 2004]. Высокотемпературная же часть фации является полем устойчивости цоизита в широко распространенных в природе цоизитовых и кианит-цоизитовых эклогитах.

В HP-условиях эклогитовой фации магматические образования с цоизитом крайне редки. Наиболее известными являются цоизитовые с фенгитом пегматиты тоналит-тронджемитового состава, образование которых объясняется парциальным плавлением вмещающих эклогитов Мюнчбергского массива, Германия [Franz, Smelik, 1995; Liebscher et al., 2007], а также содержащий цоизит мигматит в амфиболсодержащем эклогите комплекса Рауергу французского Центрального массива [Nicollet et al., 1979]. Цоизититы метасоматического генезиса распространены в высокобарическом комплексе Распас в Эквадоре в виде серии метасоматических жил в эклогитах [Herms et al., 2012]. В UHP-комплексах цоизит сосуществует с коэситом (эклогиты Даби-Сулу [Zhang, Liou, 1994 и др.]) и с алмазом (Кокчетавский массив [Zhang et al., 1997; Korsakov et al., 2002 и др.]).

В Гриндинском эклогитсодержащем комплексе цоизит является типоморфным минералом: одним из главных породообразующих минералов в кианит-цоизитовых эклогитах; в эклогитах – преимущественно в виде многочисленных мелких включений в гранатах вместе с кианитом, кварцем ± омфацитом, реже – во включениях в омфацитах или в составе локальных цоизитовых обособлений; в кианитовых эклогитах, кроме того, во включениях в кианитах, иногда совместно с омфацитом (40 % Jd).

Но главным породообразующим минералом цоизит представлен в мономинеральных цоизититах, нередко содержащих реликтовые фрагменты пород, состоящих из основного плагиоклаза (max 83 % An) ± диопсид, по которым, очевидно, и были образованы. В различной степени измененные цоизититы в Гриндинском комплексе развиты повсеместно, являясь постоянными спутниками эклогитов.

В фанерозойских эклогитовых комплексах аналоги подобных образований неизвестны,

<sup>1</sup> Символы минералов по: [Kretz, 1983].

что, возможно, отражает особенности геодинамических условий проявления высокobarического метаморфизма в раннем докембрии.

Целью настоящей статьи является анализ геологических и петрологических особенностей распространенных в Гридинском эклогитовом комплексе цоизититов и на его основе установление P-T условий метаморфизма, а также протолита и возраста этих пород.

### Геологический очерк

В составе Беломорской провинции Фенноскандинавского щита (рис. 1, а), известной неоднократными проявлениями высокobarического метаморфизма [Володичев, 1990], Гридинский эклогитсодержащий комплекс является одним из древнейших эклогитовых комплексов в мире.

После 2004 г. [Володичев и др., 2004] Гридинский комплекс стал объектом, популярным для изучения распространенных здесь эклогитов. Основным итогом проведенных исследований стала неоднозначная оценка их возраста:

1. Двукратное проявление процессов эклогитизации – в архее (~2,7 млрд лет [Бибикова и др., 2003; Володичев и др., 2004]) и в палеопротерозое (~2,4 млрд лет [Володичев и др., 2004, 2012; Слабунов и др., 2011]). Архейские эклогиты слагают тектонические фрагменты обломочного компонента в разгнейсованной гранитоидной матрице. Дискретный протерозойский эклогитовый метаморфизм проявлен в дайках базитов.

2. Эклогиты Беломорской провинции имеют только архейский возраст (~2,72–2,82 млрд лет [Dokukina et al., 2012]).

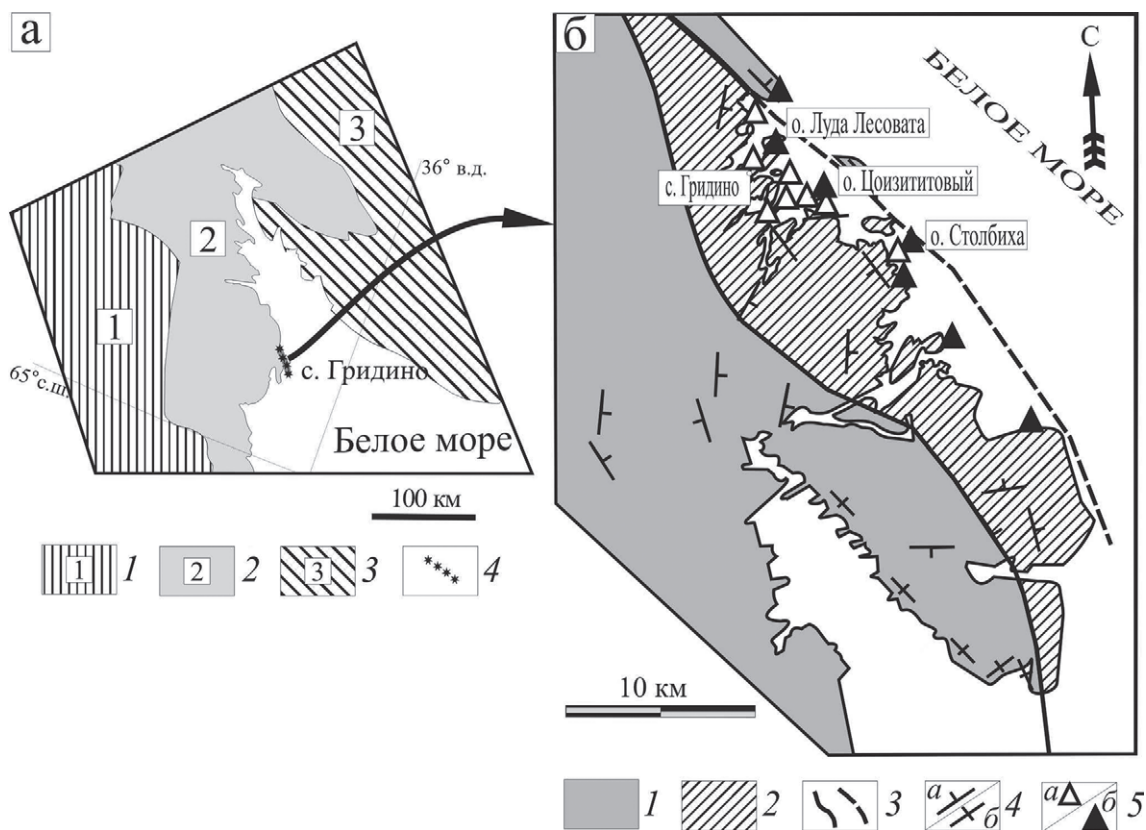


Рис. 1. а – схема тектонического районирования СВ части Фенноскандинавского щита. Провинции: Карельская (1), Беломорская (2), Кольская (3) [Слабунов, 2008], 4 – район Гридинской структуры (Северная Карелия); б – упрощенная схема строения Гридинской структуры: 1 – породы Беломорского комплекса (гнейсы, амфиболиты, тоналиты), 2 – Гридинский эклогитсодержащий комплекс, 3 – тектонические границы, 4 – элементы залегания пород (а – наклонные, б – вертикальные), 5 – места локализации изученных эклогитов (а) и цоизититов (б)

Fig. 1. а – scheme of the tectonic zonation of the northeastern Fennoscandian Shield. Provinces: Karelian (1), Belomorian (2), Kola (3) [Slabunov, 2008], 4 – Gridino area, North Karelia; б – simplified structural scheme of the Gridino structure: 1 – rocks of the Belomorian complex (gneiss, amphibolite, tonalite), 2 – Gridino eclogite-bearing complex, 3 – tectonic boundaries, 4 – gneissic banding dip (а – 30–70 deg, б – ca 90 deg) and top direction, 5 – localization sites of the studied eclogites (а) and zoisites (б)

3. Эклогитовый метаморфизм связан только с протерозойской орогенцией (~1,9 млрд лет [Скублов и др., 2011; Herwartz et al., 2012; Perchuk, Morgunova, 2014; Yu et al., 2017]). И эта точка зрения в последнее время становится все более популярной.

4. Двукратное проявление эклогитового метаморфизма: в архее – (shortly before 2,72 Ga [Balagansky et al., 2019]) и ~1,90 млрд лет (используются данные: [Скублов и др., 2011; Yu et al., 2017]).

Архейские эклогиты и продукты их интенсивного ретроградного преобразования являются в Гридинском комплексе компонентами сложного полигенного микститового комплекса, представленного обломочной составляющей – вероятными фрагментами пород тектонического меланжа [Слабунов, 2008] в преобразованной в гнейсы гранитоидной матрице.

Породы этого комплекса формируют обособленную тектоническую пластину северо-западного простирания (рис. 1, б), явившуюся декомпрессионным каналом для глубинной эксгумации эклогитов и их изофациальных спутников – метапироксенитов, цоизититов и др. Эта структура прослеживается в прибрежной полосе и на островах Белого моря на расстоянии около 50 км при ширине 6–7 км и резко отличается спецификой строения и состава от пород, распространенных в пограничных областях.

Основной объем комплекса (до 75–90 %) составляют биотит-амфиболовые, часто с гранатом и клинопироксеном гнейсы, образовавшиеся по гранитоидам тоналитового – кварцдиоритового составов и по эндербитам [Володичев и др., 2004; Сибелев и др., 2013]. В обломочной составляющей резко преобладают породы основного состава – главным образом ретроградно измененные симплектитовые эклогиты, в том числе кианитовые и кианит-цоизитовые, а также гранатовые, гранат-клинопироксеновые и полевошпатовые амфиболиты, обычно с реликтами трансформированных (перекристаллизованных с сохранением диабластической структуры) диопсид-плагиоклазовых симплектитов. Кроме того, присутствуют метапироксениты, метагабброиды, цоизититы и эпидотизированные цоизитовые породы, в единичном случае – кианит-гранат-биотитовые гнейсы (м. Кирбей) [Володичев и др., 2004; Слабунов, 2008; Сибелев и др., 2013; Максимов, 2014].

Эклогиты о. Столбиха образовались при  $T = 700\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 13\text{--}15$  кбар (прогрессивный тренд, «классические» методы [Володичев, Максимов, 2017]); при  $T = 660\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 13$  кбар

(начальный этап эклогитовой стадии, метод TWEEQU [Berman, 1991; Perchuk, Morgunova, 2014]); при  $T = 710\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 18,5$  кбар (пиковый метаморфизм, метод псевдосекций [Li et al., 2015]).

Представленный в современном виде гнейсовый комплекс, включающий многочисленные неравномерно распределенные обломки и блоки описанных выше пород, сформирован при неоднократных интенсивных структурно-метаморфических преобразованиях как архейского, так и протерозойского периодов преимущественно в условиях высокобарических гранулитовой – амфиболитовой фаций [Володичев, 1990].

Неоархейский возраст цирконов ( $2720,7 \pm 5,8$  млн лет) из симплектитовых апоэклогитов и эклогитов Гридинского комплекса (о. Столбиха) установлен на основании U-Th-Pb изотопных анализов в лаборатории изотопной геологии Шведского музея естественной истории (Стокгольм) на масс-спектрометре вторичных ионов, модель 1270 фирмы Cameca (NORDSIM) Е. В. Бибиковой [Бибикова и др., 2003; Володичев и др., 2004]. В дальнейшем [Li et al., 2015] на этом же объекте при более детальном геохронологическом изучении результаты U-Pb датирования цирконов LA-ICP-MS методом (Пекинский университет) подтвердили неоархейский (около 2,7 млрд лет) возраст эклогитов. Сопоставимый неоархейский возраст  $2719 \pm 8$  млн лет был получен и для цоизититов [Слабунов и др., 2015].

Протерозойский возраст ( $1878 \pm 18$  млн лет [Скублов и др., 2011]) определен в зонах обрастания округлых архейских (~2,7 млрд лет) цирконов, а также [Yu et al., 2017] в нехарактерных для цирконов эклогитов призматических кристаллах ( $Ky = 2\text{--}4$ ), содержащих включения архейских (~2,7 млрд лет) цирконов вместе с омфацитом и диопсидом, содержащим 7,7 % Jd (!). Эти данные вместе с результатами детального геолого-петрологического изучения [Володичев, Максимов, 2017] являются основанием для заключения о том, что протерозойский возраст соответствует позднему процессу ретроградного преобразования эклогитов в условиях амфиболитовой фации, соответствующего времени образования пегматита ( $1875 \pm 30$  млн лет [Скублов и др., 2011]), текущего в данном обнажении все в различной степени преобразованные эклогиты.

Цоизититы, ставшие объектом настоящего изучения, имеют широкое распространение в Гридинском комплексе: от о. Никонова на юге (южнее о. Столбиха) до м. Кирбей на севере, выступая, таким образом, в качестве постоян-

ного спутника эклогитов (рис. 1, б), занимая вместе с ними такое же геологическое положение в виде обломков и блоков в гнейсо-гранитоидной матрице. Как и эклогиты, они подверглись наложенным ретроградным преобразованиям.

В лучшем состоянии сохранились цоизититы, обнаруженные на расположенном к западу от о. Избная Луда острове, получившем в ходе проведенных исследований название Цоизититовый из-за значительной концентрации в гра-

нитоидной матрице обломков и блоков цоизититов и максимального их размера (рис. 2), что и послужило основанием для его выбора в качестве главного объекта детального изучения.

В СВ части острова (рис. 2) фиксируется скопление овальных тел интенсивно измененных эклогитов различных размеров – от 4×4 до 40×10 м. При ранних исследованиях [Володичев и др., 2004, обр. В-7-2] в них был выявлен реликтовый гранат-омфацитовый парагенезис. Южнее распространены более мелкие тела гра-

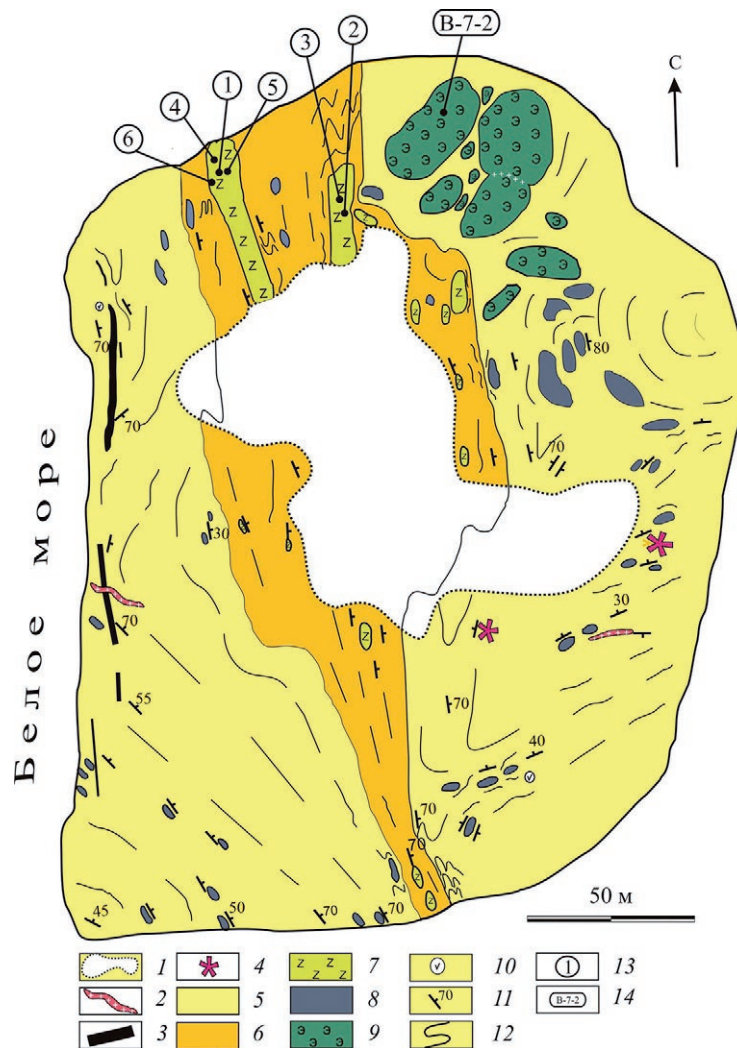


Рис. 2. Схема геологического строения о. Цоизититового (сост. А. И. Слабунов и О. А. Максимов):

1 – четвертичные отложения; 2 – пегматитовые жилы (1,88 млрд лет); 3 – палеопротерозойские дайки Mg-метадiorитов [Степанов, Степанова, 2006]; 4–10 – неоархейские породы: 4 – метаэндрбиты, 5 – амфибол-биотитовые разгнейсованные граниты, 6 – амфибол-биотитовые разгнейсованные граниты с включениями цоизититов, 7 – цоизититы, 8 – гранатовые амфиболиты, 9 – амфиболлизированные симплектитовые эклогиты (2,72 млрд лет), 10 – метаяльтрабазиты; 11 – гнейсовидность; 12 – структурные линии; 13 – места отбора проб цоизититов (1–6 – номера соответствуют таковым в табл. 1); 14 – место взятия пробы В-7-2 из амфиболлизированного симплектитового эклогита [Володичев и др., 2004]

Fig. 2. Geological scheme of Tsoizititovy Island (by A. I. Slabunov and O. A. Maksimov):

1 – Quaternary rocks; 2 – pegmatite veins (1,88 Ga); 3 – Paleoproterozoic dikes of Mg-metadiorites [Stepanov, Stepanova, 2006]; 4–10 – Neoproterozoic rocks: 4 – metaenderbites, 5 – amphibole-biotite gneissose granites with zoisites inclusions, 6 – amphibole-biotite gneissose granites with zoisites inclusions, 7 – zoisitites, 8 – garnet amphibolites, 9 – amphibolized symplectitic eclogites (2,72 Ga), 10 – meta-ultrabasic rocks; 11 – gneissosity; 12 – trend lines of gneissosity; 13 – the positions and number (1–6, Table 1) of zoisitites samples; 14 – position and number of amphibolized symplectitic eclogite [Volodichev et al., 2004]

натовых амфиболитов. В северной и центральной частях острова картируется зона гнейсов с многочисленными включениями цоизитов, которые образуют как мелкие, так и крупные (протяженностью до 60 м и мощностью до 10 м) тела линзовидной формы (рис. 2). Разгнеиванный эклогит-цоизититсодержащий комплекс сечется соответственно дайкой и жилой массивных палеопротерозойских магнезиальных метадiorитов и пегматитов, что определяет верхнюю возрастную границу его формирования [Слабунов и др., 2015].

## Методы исследования

Аналитические работы проводились в Аналитическом центре ИГ КарНЦ РАН (рук. А. И. Михайлова). Микрозондовые анализы породобразующих минералов выполнены на сканирующем микроскопе VEGA II LSH с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 350 (аналитики А. Н. Сафронов, А. Н. Терновой). При расчетах формул минералов использовались программы TPF 7,0 (ИЭМ РАН) и Make\_Mineral. 19 для MS Excel (ИГЕМ РАН, 2004). Помимо микрозондового анализа цоизиты и эпидоты разных генераций были идентифицированы методом Рамановской спектроскопии на приборе Nicoletе Almega XR (аналитик В. А. Колодей).

Силикатным анализом определялись состав пород и монофракции цоизита (проба 1603а, табл. 1) (аналитики А. И. Полищук, В. А. Утицына, Л. М. Демешина, М. В. Эхова); содержание редких и рассеянных элементов в породах и содержание Zr в монофракциях рутилов и титанитов – соответственно методами ICP-MS и LA-ICP-MS на приборе X-Series 2 ICP-MS (Thermo Scientific, США) (аналитик А. С. Парамонов).

## Результаты исследований

Основным объектом изучения цоизититов на о. Цоизититовом стала северная часть крупного тела – ксенолита в гранитоидной матрице (рис. 2), сложенного преимущественно анхимоминеральным цоизитом белого цвета (обр. GR10-6/2, табл. 1; GR-10, 1030). Другая разновидность мономинерального цоизитита имеет бледно-зеленую, фисташковую окраску (обр. GR10-6/1, 1602, табл. 1). Эти породы в основном локализованы в другом крупном теле, к востоку от первого (рис. 2). По химическому составу они отличаются повышенным содержанием  $TiO_2$  (1,57–3,63 мас. %) и целого ряда микроэлементов – Cr, V, Cu, Nb, Zr, Hf, Y и HREE (табл. 1), а также отрицательной  $Eu/Eu^*$

аномалией (рис. 3). Эти различия, вероятно, обусловлены вариациями в составе протолита.

Среди цоизититов выделяются кварцсодержащие разновидности (обр. 1603, табл. 1; 1602–2) с варьирующим содержанием кварца до сегрегаций кварцевого с цоизитом состава в виде малой мощности линейно вытянутых прожилков. Их химический состав несколько отличается повышенным содержанием  $SiO_2$ , но содержание микроэлементов и спектр распределения REE сопоставимы с мономинеральными цоизититами (табл. 1, рис. 3).

Другая разновидность – плагиоклазсодержащие цоизититы (обр. 258–3, 258–4, 1603–1, 1603-2а-в, 1603-2а-2). Некоторые из них ассоциируют с более крупными (несколько метров) реликтовыми образованиями протолита, состоящего из основного плагиоклаза, иногда вместе с диопсидом, наблюдаемым в редких маломощных ориентированных полосах среди однообразной белоокрашенной массы, скрывающей соотношения с цоизититами и размеры включений. Другие в мономинеральной цоизитовой массе содержат более мелкие реликтовые включения плагиоклазовых агрегатов размерами от 2–3 до 10–15 мм (рис. 4). Они окрашены в красноватые тона, на фоне которых наблюдаются точечные выделения белого цоизита. Участки такого типа плагиоклазовых цоизититов фрагментарны, а содержание разобщенных обособлений плагиоклазов варьирует, составляя в отдельных случаях до 5–10 % общей массы породы.

Содержание петрогенных и малых элементов в них сопоставимо с мономинеральными цоизититами, но присутствие в породе плагиоклазов отмечено положительной  $Eu/Eu^*$  аномалией (табл. 1, рис. 3).

Результаты изучения показали, что плагиоклазсодержащие цоизититы являются наиболее информативными для определения протолита и установления особенностей их метаморфизма на прогрессивной и ретроградных стадиях эволюционного тренда.

**Петрография, химический состав минералов, метаморфизм.** Плагиоклазы в плагиоклазсодержащих цоизититах имеют широкий спектр составов от основного битовнита (82–83 % An) до альбита с тремя максимумами: 77–79, 63–65 и 0–10 % An (рис. 5), соответствующими основным его генерациям.

Ранняя генерация плагиоклазов (82–83 и 67–68 % An), образующая мозаичные агрегаты мелких зерен, выделяется интенсивным развитием по ним мелкочешуйчатых скоплений слюд (рис. 6, а), представленных мусковитами (Ms I) и фенгитами с содержанием  $Si = 3,15–3,27$  к. ф. (табл. 2).

Таблица 1. Содержание главных элементов (мас. %) и элементов-примесей (г/т) в цоизититах, цоизитах и анортозите из расслоенного анортозитового массива [Hoffman et al., 2012]

Table 1. Major (wt %) and trace elements (ppm) composition of the zoisitites, zoisites and anorthosite from a layered massive of anorthosite [Hoffman et al., 2012]

№ обр. Sample no.	GR10-6/2	1602	GR10-6/1	1603	258	1603-2a	258a	1603a	477950
№ ан. Analysis no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO <sub>2</sub>	43,52	40,24	45,50	54,92	44,1	40,16	–	39,73	48,93
TiO <sub>2</sub>	0,43	3,63	1,57	0,39	0,52	0,32	–	0,23	0,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28,64	27,26	26,51	22,75	28,27	30,84	–	31,24	31,89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,46	2,25	2,00	1,93	2,20	2,58	–	2,56	1,18
FeO	0,28	0,36	0,43	0,29	0,43	0,43	–	0,14	
MnO	0,02	0,019	0,01	0,01	0,018	0,021	–	0,01	0,02
MgO	0,11	0,51	0,05	0,12	0,41	0,35	–	0,34	0,33
CaO	21,24	23,00	21,43	17,23	21,50	22,40	–	23,10	15,35
Na <sub>2</sub> O	0,58	0,11	0,24	0,21	0,32	0,48	–	0,10	2,27
K <sub>2</sub> O	0,23	0,01	0,04	0,06	0,14	0,10	–	0,08	0,19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06	0,32	0,15	0,20	0,03	0,07	–	0,05	0,01
H <sub>2</sub> O	0,07	0,01	0,03	0,05	0,03	0,19	–	0,02	
п. п. п. LOI	–	1,93	1,77	1,52	1,93	1,78	–	2,02	0,45
Cr	88,00	1044	564,00	62,57	154,35	35,61	291,1	83,13	7,87
Ni	7,00	16,42	80,00	17,19	6,69	15,70	2,57	13,59	26,80
Co	1,00	0,64	1,00	0,50	1,69	0,68	1,51	0,66	44,80
Sc	6,00	58,44	43,00	6,37	–	4,51	–	13,03	6,41
V	73,00	131,80	137,00	51,79	75,99	71,36	53,34	81,62	13,40
Cu	12,00	8,81	33,00	3,95	–	3,73	–	4,10	10,30
Rb	5,00	0	1,00	0,77	2,66	1,59	0	0,83	2,80
Ba	16,00	9,39	0	14,66	14,95	18,58	11,80		34,44
Sr	1053	1034	1132	857,90	1214,44	1080	1159	1352	133,20
Ta	0,28	2,20	1,61	0,19	0	0,19	–	0,35	
Nb	4,00	30,56	17,10	2,90	4,79	2,43	2,22	2,10	0,58
Hf	1,67	3,73	3,06	0,88	–	1,38	–	0,88	0,21
Zr	38,00	106,60	63,00	24,97	42,99	42,29	663,3	24,27	7,31
Ti	2578	21350	9412	2062	3117	1583	1492	1532	
Y	6,00	17,61	19,00	5,43	7,43	5,77	7,40	10,99	2,85
Th	3,01	2,58	1,55	3,17	3,03	5,73	1,30	3,56	0,19
U	0,14	0,50	0,28	0,15	0,17	0,24	0,18	0,18	0,78
La	26,04	19,11	24,92	25,11	31,02	29,53	36,41		2,86
Ce	48,54	33,52	62,14	37,11	58,37	39,78	67,72	66,80	4,53
Pr	4,71	4,87	7,72	4,97	5,80	5,13	5,27	8,89	0,50
Nd	18,46	18,91	34,92	17,58	22,95	17,10	25,56	31,53	1,85
Sm	2,75	3,98	7,36	2,55	3,20	2,25	3,80	5,15	0,37
Eu	0,94	0,96	0,84	0,85	1,13	1,12	1,19	1,48	0,28
Gd	2,38	3,58	5,95	1,77	2,98	1,57	4,09	3,76	0,49
Tb	0,24	0,60	0,78	0,24	0,32	0,21	0,41	0,50	0,07
Dy	1,28	3,55	4,44	1,16	1,63	1,11	2,20	2,38	0,47
Ho	0,22	0,73	0,77	0,21	0,28	0,21	0,29	0,41	0,11
Er	0,66	2,20	2,24	0,60	0,82	0,67	0,81	1,16	0,29
Tm	0,08	0,34	0,26	0,08	0,10	0,09	0,10	0,16	0,05
Yb	0,59	2,35	2,04	0,56	0,76	0,70	0,60	0,99	0,29
Lu	0,07	0,34	0,24	0,08	0,10	0,10	0,09	0,14	0,05
Sr/Sr*	2,67	3,11	1,84	2,55	2,51	3,14	2,11	2,23	3,49



Окончание табл. 1  
Table 1 (continued)

№ обр. Sample no.	GR10-6/2	1602	GR10-6/1	1603	258	1603-2a	258a	1603a	477950
№ ан. Analysis no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Eu/Eu*	1,13	0,78	0,39	1,23	1,12	1,83	0,92	1,03	2,03
Ce/Ce*	1,05	0,83	1,07	0,79	1,04	0,77	1,17		0,91
Lu <sub>N</sub> /La <sub>N</sub>	0,03	0,17	0,03	0,09	0,03	0,03	0,02		0,15
Lu <sub>N</sub> /Gd <sub>N</sub>	0,24	0,77	0,37	0,33	0,27	0,52	0,17	0,30	0,76
Sm <sub>N</sub> /La <sub>N</sub>	0,17	0,34	0,16	0,48	0,17	0,12	0,17		0,21

Примечание. 1–6 – цоизититы о. Цоизититовый (пояснения в тексте); 7, 8 – цоизиты из цоизититов; 9 – анортозит из рас- слоенного анортозитового комплекса Нааят Кууэт (Naajat Kuuat), Западная Гренландия [Hoffman et al., 2012]. Прочерк – не определялось, 0 – ниже предела определения.

Note. 1–6 – zoisitites of Zoisititovy Island (see the explanations in the text); 7, 8 – zoisites from the zoisitites; 9 – anortosite from the layered anortosite massive Naajat Kuuat, Western Greenland [Hoffman et al., 2012]. Line – not determined, 0 – below the limit of definition.

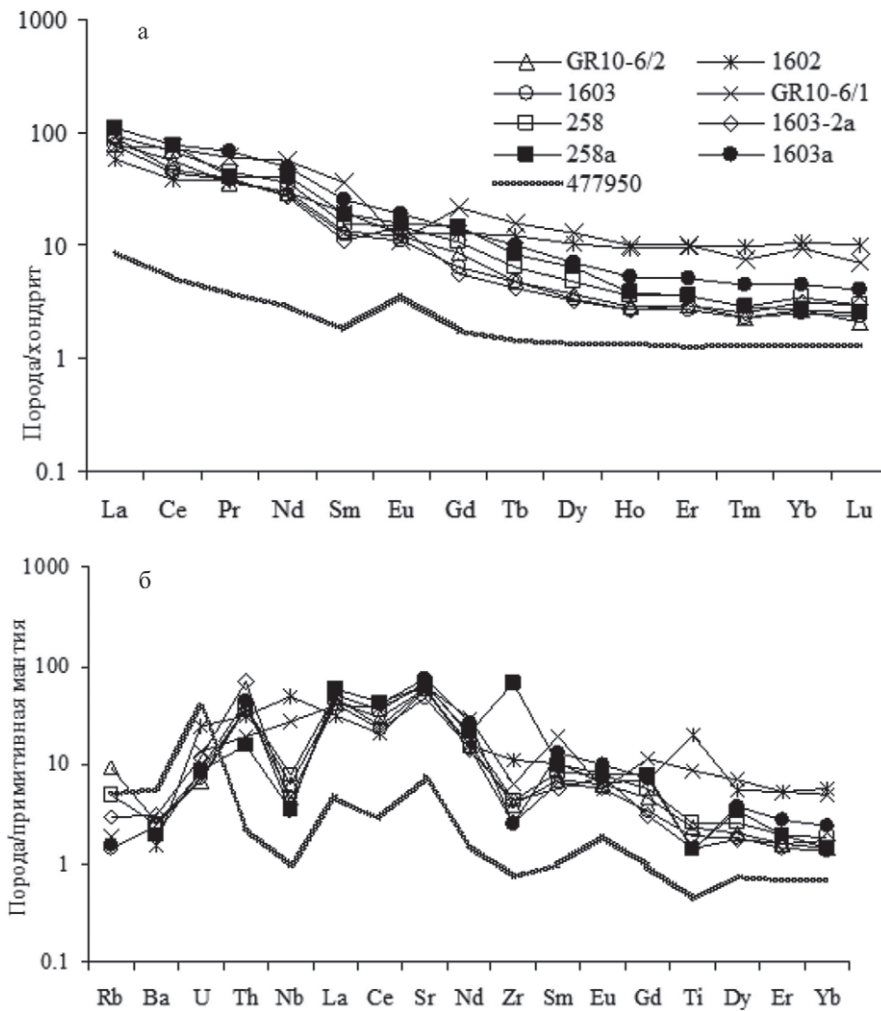


Рис. 3. Нормированные к хондриту [Taylor, McLennan, 1985] содержания РЗЭ (а) и нормированные к примитивной мантии [Hofmann, 1988] содержания рассеянных элементов (б) в породах цоизитового и анортитового состава. Номера пород и минералов соответствуют приведенным в табл. 1

Fig. 3. The contents of REE (a) normalized to chondrite [Taylor and McLennan, 1985] and the content of rare-earth elements normalized to the primitive mantle [Hofmann, 1988] (b) in the rocks of zoisite and anorthite compositions. The numbers of rocks and minerals correspond to those given in Table 1

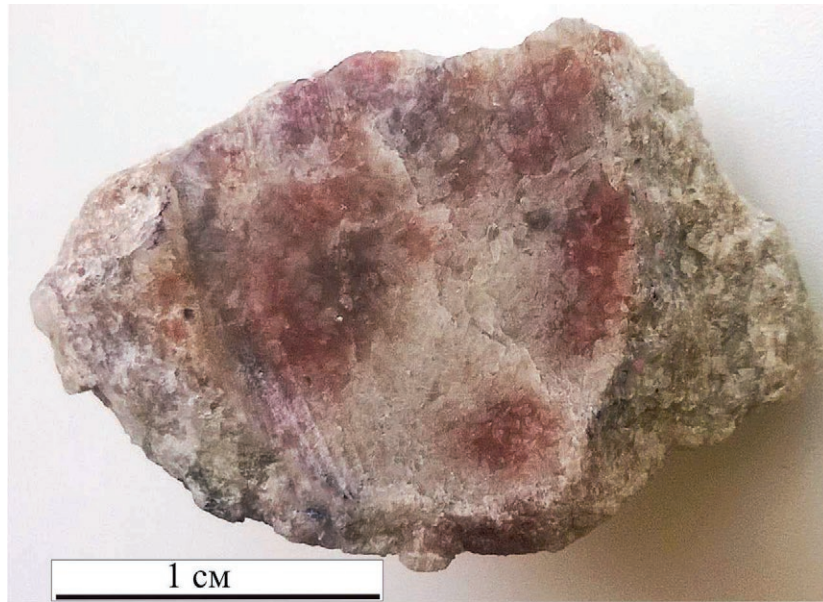


Рис. 4. Фотоизображение обр. 1603-2а. В светло-сером поле мономинерального цоизитита – реликтовые обособления основного плагиоклаза с наложенной минерализацией слюд и мелких кристаллов цоизита  
 Fig. 4. Photo image sample 1603-2a. In the light gray field of monomineralic zoisite, there are relict isolations of the calcium-rich plagioclase with superimposed micas and small crystals of zoisite

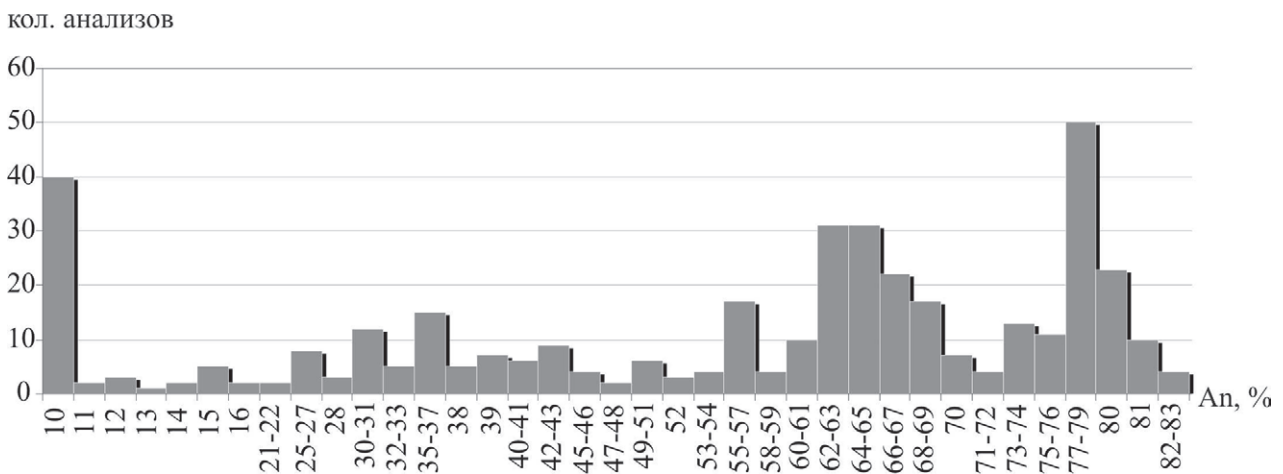


Рис. 5. Гистограмма составов плагиоклазов в реликтовых плагиоклазовых обособлениях. Выделяющиеся максимумы (77–79, 63–65, 0–10 % An) соответствуют генерациям плагиоклазов  
 Fig. 5. Histogram of plagioclase compositions in relict plagioclase isolations. The prominent maxima (77–79, 63–65, 0–10 % An) correspond to the generation of plagioclases

В плагиоклаз-слюдяном комплексе наблюдаются новообразования кристаллов цоизита разного размера и формы. Некоторые из них содержат включения плагиоклазов (67–68 % An, рис. 6, б), иногда в ассоциации с фенгитами (Si = 3,18–3,19 к. ф.) (табл. 2). При этом устанавливается зональность:  $Zo_{0,12}^1$  вблизи включения плагиоклаза →  $Zo_{0,17}$  в краевой части

кристалла (рис. 6, в; табл. 3, ан. 1–2). По периферии обособления такого состава наблюдается переход в мономинеральные цоизиты, состоящие из цоизитов (97–98 %) с небольшим количеством кварца и мусковитизированного плагиоклаза. Формы кристаллов размером до 3–4 мм различные – от ксеноморфной до идиоморфной с ростовой зональностью (центр  $Zo_{0,12}$  → край  $Zo_{0,17}$ , рис. 6, в; табл. 3, ан. 3–4). Цоизиты подобного размера часто содержат

<sup>1</sup> Цифры соответствуют значениям  $X_{Ps}$  (табл. 3).

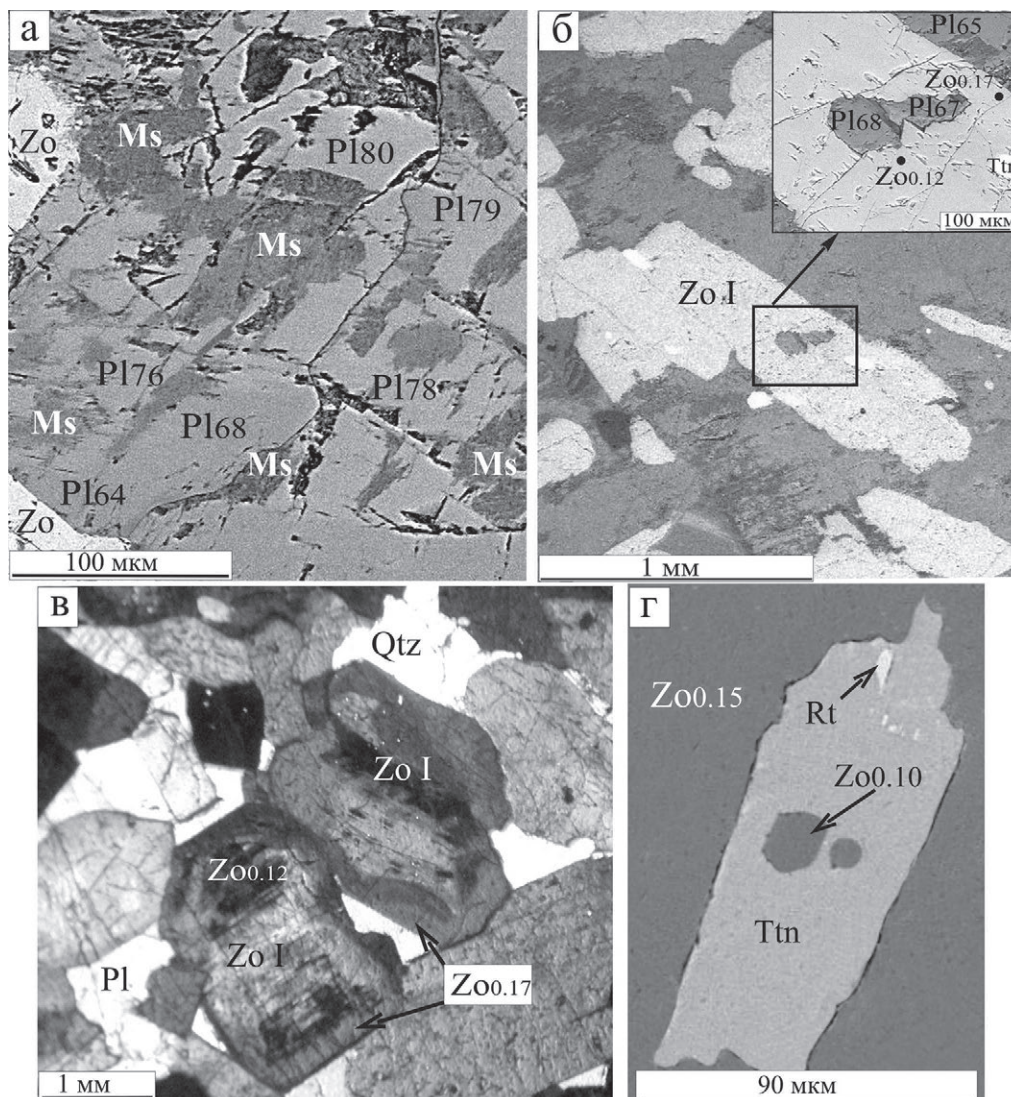


Рис. 6. Микрофотографии PI-содержащих цоизитов:

а – основной PI замещается мелкочешуйчатым фенгит-мусковитовым агрегатом (шл. 1603-2а-2); б – включение мусковитизированного  $PI_{67-68}$  в зональном Zo I ( $Zo_{0,12} \rightarrow Zo_{0,17}$ ) (шл. 1603-2в); в – сдвойникованные зональные ( $Zo_{0,12} \rightarrow Zo_{0,17}$ ) идиоморфные и субидиоморфные кристаллы Zo I (шл. 1030); г – в  $Zo_{0,15}$  – включение титанита, содержащего мелкие включения  $Zo_{0,10}$  и Rt (шл. 258-4). Изображения в отраженных электронах (а, б, г) и николях X (в)

Fig. 6. Photomicrographs of PI-bearing zoisites:

а – calcium-rich PI is replaced by finely squamosed aggregate of muscovites and phengites (thin section. 1603-2a-2); б – muscovitized  $PI_{67-68}$  inclusion in zoned Zo I ( $Zo_{0,12} \rightarrow Zo_{0,17}$ ) (thin section 1603-2b); в – twinned zoned ( $Zo_{0,12} \rightarrow Zo_{0,17}$ ) idiomorphic and sub-idiomorphic Zo I crystals (thin section 1030); г – titanite inclusion in  $Zo_{0,15}$ ; it contains  $Zo_{0,10}$  and Rt (thin section 258-4) inclusions. Images in reflected electrons (a, б, г) and x-nicols (в)

включения более мелких субидиоморфных кристаллов Zo размером 150–300 мкм. Среднее содержание  $X_{Ps}$  во включениях и в минералах-хозяевах примерно равное –  $Zo_{0,16-0,17}$  (табл. 3, ан. 5–6), но в том и другом случае фиксируются  $Zo_{0,10-0,12}$ . Редко во включениях встречаются минералы Czo – Ep группы (табл. 3, ан. 15–16), вероятно, сосуществующие с Zo.

Обогащенные  $TiO_2$  зеленые цоизиты (табл. 1) содержат до 3 % титанита двух морфо-

типов: а) в виде мелких (5–30 мкм) включений в  $Zo_{0,10-0,11}$  и б) в виде скоплений более крупных зерен (до 200–300 мкм) между кристаллами  $Zo_{0,14-0,16}$  более поздней генерации, не содержащей включений (табл. 3, ан. 7–8).

В кварцсодержащих цоизититах выделяются две текстурные группы: массивная с ксеноморфными зернами Zo и ориентированная – в зонах деформаций с субидиоморфными удлинено-призматическими кристаллами Zo.

Таблица 2. Микрорзондовые анализы (мас. %) и кристаллохимические формулы (к. ф.) фенгитов из цоизититов Гридинского комплекса

Table 2. Microprobe analyses (wt %) and crystallochemical formulas (a. p. f. u.) of phengites from zoisitites from the Gridino complex

№ обр. Samples no.	258-4	1603-2a-2	258-4	1603-2a-2	1603-2a-2	258-4	1603-1	1603-2a	1603-2в	GR 10
№ ан. Analysis no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO <sub>2</sub>	48,89	49,24	48,09	49,07	49,58	49,65	50,13	51,21	48,43	46,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,71	36,18	33,07	34,54	34,66	33,39	34,83	34,37	35,20	32,24
FeO*	1,02		1,26			0,80			1,24	1,58
MnO								0,58		
MgO	1,78	0,80	1,93	1,06	1,01	2,06	0,90	0,55		1,45
CaO										
Na <sub>2</sub> O	0,57	0,58		1,03	0,50		0,84	1,38		
K <sub>2</sub> O	11,55	11,51	11,63	10,59	11,15	11,84	10,83	10,42	11,56	10,78
Сумма Total	98,52	98,31	95,98	96,29	96,90	97,74	97,53	98,51	96,43	92,50
O	11									
Si	3,15	3,16	3,19	3,20	3,22	3,22	3,23	3,27	3,18	3,19
Al	2,64	2,73	2,58	2,66	2,65	2,55	2,64	2,58	2,72	2,61
Fe <sup>2+</sup>	0,06		0,07			0,04			0,07	0,09
Mn								0,03		
Mg	0,17	0,08	0,19	0,10	0,10	0,20	0,09	0,05		0,15
Ca										
Na	0,07	0,07		0,13	0,06		0,11	0,17		
K	0,95	0,94	0,98	0,88	0,92	0,98	0,89	0,85	0,97	0,94
Сумма Total	7,04	6,98	7,01	6,97	6,95	6,99	6,96	6,95	6,94	6,98
F, %	26,1		26,9			16,7				37,5

Примечание. \*Здесь и в табл. 3, 4 все железо в виде FeO. F, % = Fe<sup>2+</sup> / (Fe<sup>2+</sup>+Mg) \* 100. Ан.: 1-8 – в мелкочешуйчатых агрегатах, развивающихся по плагиоклазам; 9, 10 – включения в цоизитах.

Note. \*Here and in Tables 3, 4 all iron as FeO. F, % – iron number Fe<sup>2+</sup> / (Fe<sup>2+</sup>+Mg) \* 100. An: 1-8 – fine-grained aggregates, growing in plagioclase; 9, 10 – inclusion in zoisitites.

По составу цоизиты этих групп близки (табл. 3, ан. 9–10). В них слабо проявлена прогрессивная зональность, при этом самые краевые зоны иногда представлены Czo – Ep. Постоянными включениями в кристаллах Zo являются кварц и титанит.

По совокупности изложенных данных можно заключить, что при образовании цоизититов вариации составов Zo в интервале X<sub>Ps</sub> = 0,10–0,17 отражают прогрессивный тренд развития метаморфических процессов. И наглядным подтверждением этого вывода является изображенное на рис. 6, г зерно титанита, включенное в Zo<sub>0,15</sub> и при этом содержащее включение Zo<sub>0,10</sub> и Rt (табл. 3, ан. 11–12).

Информация о последующих минеральных преобразованиях содержится в тех же плагиоклазовых обособлениях, в которых фиксируется новая генерация Pl II (60–66, max 63–65 % An, рис. 5) в виде неправильной формы зерен размером до нескольких миллиметров. Они

несут четкие признаки более позднего образования относительно плагиоклазов ранней генерации, слюд и цоизитов (рис. 7, а). При этом Pl II не подвергается процессам ослюденения, но довольно часто содержит темновые реликтовые включения этих компонентов (рис. 7, б).

В редких случаях во фрагментах преобразованного протолита встречается диопсид (табл. 4, ан. 1). В изученном обр. 258-3 он плохо сохранился и наблюдается в виде реликтов среди образовавшейся по нему тремолитовой массы (рис. 7, в; табл. 4, ан. 3). Реликтовым, вероятно, является и плагиоклаз (60–66 % An), по которому образуется Zo II в виде кварц-цоизитовых симплектитов (рис. 7, г). Цоизит имеет относительно стабильный состав (X<sub>Ps</sub> = 0,10, табл. 3, ан. 13). Широко распространенным минералом в этой ассоциации является эпидот (рис. 7, г; табл. 3, ан. 17), содержащий включения основного плагиоклаза, слюды, цоизита и диопсида (табл. 4, ан. 2). По характеру взаи-

Таблица 3. Микросондовые анализы (мас. %) и кристаллохимические формулы (к. ф.) цоизитов и эпидотов из цоизитов Грдинского комплекса  
 Table 3. Microprobe analyses (wt %) and crystallochemical formulas (a. p. f. u.) of zoisites and epidotes from zoisites from the Gridino complex

Компонент Component	Zo I												Zo II	Zo III	Ep I		Ep II
	1603-2в	1603-2в	1030	258-4	258-4	1602	1602	1602-2	1602-2а	258-4а	258-4а	258-4а			258-4а	258-4а	
№ обр. Samples no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
№ ан. Analysis no.																	
Место ан. Location	ц	кр	ц	кр	вкл	хоз	а	б	а	б	а	б			вкл	вкл	
SiO <sub>2</sub>	37,99	38,26	39,80	38,68	38,91	38,89	38,69	38,40	38,87	39,44	39,59	39,56	39,87	40,25	38,13	38,24	38,93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,53	30,93	32,75	30,70	31,15	30,59	31,30	31,35	30,93	31,10	32,08	31,50	33,08	32,23	29,97	27,70	28,70
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>																	
FeO*	1,86	2,60	1,89	2,67	2,41	2,52	1,47	2,41	2,36	2,47	1,04	2,39	1,60	1,05	3,17	5,48	5,59
CaO	24,20	24,69	25,51	24,84	24,96	24,26	24,18	24,18	25,11	25,33	25,16	23,53	24,13	25,83	24,96	24,36	24,65
K <sub>2</sub> O												0,43		0,40			
Сумма Total	95,58	96,48	99,95	96,89	97,43	96,26	95,64	96,34	97,27	98,34	97,87	97,41	98,68	99,76	96,23	96,38	97,87
O									12,5								
Si	2,98	2,99	2,99	3,01	3,01	3,04	3,03	3,00	3,01	3,02	3,01	3,05	3,01	3,03	3,00	3,05	3,05
Al	2,92	2,85	2,90	2,82	2,84	2,82	2,89	2,88	2,82	2,81	2,87	2,86	2,95	2,86	2,78	2,60	2,65
Cr																0,04	
Fe <sup>3+</sup>	0,12	0,17	0,12	0,17	0,16	0,17	0,10	0,16	0,15	0,16	0,10	0,15	0,10	0,07	0,21	0,37	0,37
Ca	2,04	2,07	2,05	2,07	2,07	2,03	2,03	2,02	2,09	2,08	2,05	1,94	1,95	2,08	2,11	2,08	2,07
K												0,04		0,04			
Сумма Total	8,06	8,08	8,06	8,07	8,08	8,06	8,05	8,06	8,07	8,07	8,03	8,04	8,01	8,08	8,10	8,14	8,14
X <sub>Ps</sub>	0,12	0,17	0,12	0,17	0,16	0,17	0,10	0,16	0,15	0,16	0,10	0,15	0,10	0,08	0,21	0,38	0,36

Примечание. ц – центр, кр – край, вкл – включение, хоз – хозяин. Анализы: 7, 8 – две генерации Zo<sub>0,10</sub> (а) и Zo<sub>0,16</sub> (б) из светло-зеленого цоизита; 9, 10 – Zo из массивного (а) и расщепленного (б) кварцсодержащего цоизита; 11, 12 – включение Zo<sub>0,10</sub> (а) и Rt в титаните, который является включением в Zo<sub>0,15</sub> более поздней генерации. Другие пояснения в тексте. X<sub>Ps</sub> = Fe<sup>3+</sup> / (Fe<sup>3+</sup>+Al-2).

Note. ц – core, кр – rim, вкл – inclusion, хоз – matrix. Analysis: 7, 8 – two generations Zo<sub>0,10</sub> (a) and Zo<sub>0,16</sub> (b) from pale green zoisites; 9, 10 – Zo from massive (a) and deformed (b) quartz-bearing zoisites; 11, 12 – inclusions Zo<sub>0,10</sub> (a) and Rt in titanite which is an inclusion in Zo<sub>0,15</sub> late generation. The other explanations are in the text. X<sub>Ps</sub> = Fe<sup>3+</sup> / (Fe<sup>3+</sup>+Al-2).

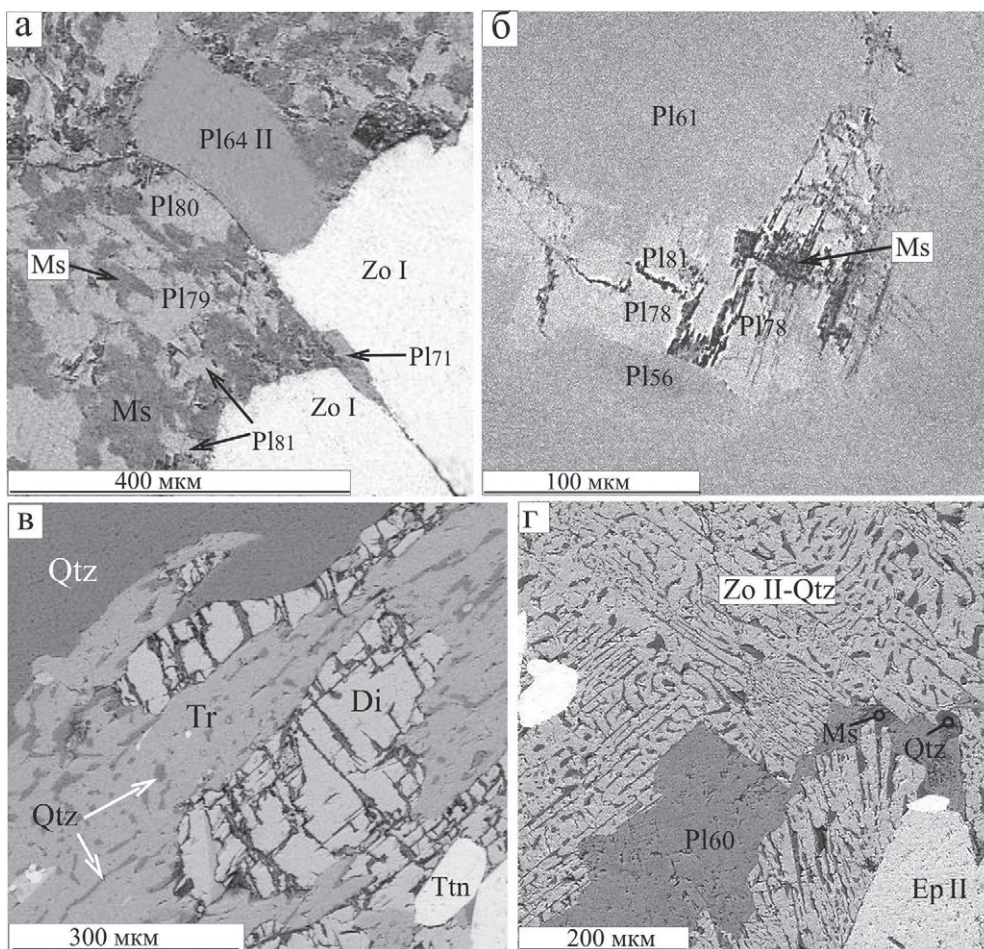


Рис. 7. Минерализация первого этапа ретроградных преобразований:

а –  $Pl_{64}$  II, образовавшийся позднее PI I, слюд и Zo I, не подвергшийся процессу мелкочешуйчатой мусковитизации (шл. 1603-2а); б – PI II нередко содержит включения PI-Ms компонента (шл. 1603-2а-2); в – реликтовый диопсид в тремолитовой массе (шл. 258-3); г – Zo II в кварц-цоизитовом симплектите и образовавшийся позднее Ep II. Изображения в отраженных электронах

Fig. 7. Mineralization at the first stage of retrograde metamorphism:

а –  $Pl_{64}$  II, which formed later PI I, micas and Zo I, which has not been subjected to finely squamosed muscovitization (thin section 1603-2a); б – PI II often contains PI-Ms inclusions (thin section 1603-2a-2); в – relict diopside in tremolite matrix (thin section 258-3); г – Zo II in quartz-zoisite symplectite and Ep II, which formed later. Images in reflected electrons

моотношения с кварц-цоизитовым симплектитом (Zo II-Qtz) предполагается его относительно позднее образование, возможно, на поздней стадии единого процесса: PI II – Zo II (+Tr) – Ep II.

Следующий этап метаморфического преобразования пород, отчетливо проявленный в тех же участках цоизит-плагноклазового состава, обозначен кристаллизацией новой генерации цоизита (Zo III) преимущественно в виде друзовых или щетковидных агрегатов, состоящих, как правило, из сдвойникованных шестоватых мелкозернистых кристаллов гомогенных и симплектитовых с вростками альбитовой составляющей. Они развиваются по плагноклазу, образуя каймы по краям кристаллов плагноклаза, раннего цоизита (рис. 8, а), кварц-цоизитового

симплектита (Zo II-Qtz) и Ep II (рис. 8, б). Нередки самостоятельные агрегаты кристаллов цоизита (альбит-цоизитовые симплектиты), имеющих X-образную форму (рис. 8, в).

Вблизи агрегатов Zo III и в интерстиционных окнах отмечается постепенное изменение составов плагноклаза от 70–60 % An до альбита (5–10 % An) (рис. 5). Четко устанавливается парагенезис Zo III ( $X_{ps} = 0,08$ , табл. 3, ан. 14) – Ms II – Ab (рис. 8, г). Мусковит образует разного размера ограненные чешуйки. Альбит наблюдается в виде различных по размеру и форме выделений – округлых, соизмеримых с PI II зерен, в виде зон при реакционных соотношениях с основными плагноклазами, а также во включениях в Zo III и Ms и др.

Таблица 4. Микрзондовые анализы (мас. %) и кристаллохимические формулы (к. ф.) диопсидов (1, 2) и тремолита (3) из цоизититов Гридинского комплекса

№ обр. Samples no.	258-3	258-3	258-3
№ ан. Analysis no.	1	2	3
SiO <sub>2</sub>	53,42	53,89	58,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,87	2,13	1,40
FeO	4,56	3,45	2,45
MgO	14,78	16,02	22,34
CaO	24,50	24,66	13,49
Na <sub>2</sub> O			
K <sub>2</sub> O			
Сумма Total	99,13	100,15	97,70
O	6		23
Si	1,98	1,97	7,93
Al	0,02	0,09	0,22
Fe <sup>2+</sup>	0,14	0,11	0,28
Mg	0,82	0,87	4,55
Ca	0,97	0,96	1,98
Na			
K			
Сумма Total	3,93	4,00	14,96
F, %	14,6	11,2	5,8

Примечание. Диопсиды: 1 – реликт в тремолитовой массе (3); 2 – включение в эпидоте.

Note. Diopsides: 1 – relic in tremolite mass (3); 2 – inclusions in epidote.

Для наиболее распространенного акцессорного минерала – титанита (до 1–3 % в зеленых цоизититах) устанавливается его парагенетическая связь со всеми генерациями цоизитов. Рутил в основном наблюдается в мономинеральных цоизититах в виде монокристаллов, часто обрастающих каймами титанитов, а также в виде мелких включений в титанитах, в обр. 284-4 – совместно с Zo<sub>0,10</sub> (рис. 6, г).

Минеральные ассоциации в цоизититах на разных стадиях их образования и ретроградных изменений представлены на рис. 9.

Реликтовыми минералами, соответствующими протолиту, являются плагиоклазы ( $\geq 82-83$  % An)  $\pm$  диопсид. На ранней стадии метаморфизма происходило интенсивное разви-

тие по плагиоклазам мелкочешуйчатых слюдистых агрегатов со снижением An-составляющей в плагиоклазах до 63–65 % An. Подвергались изменениям и Pl<sub>82-83</sub>, что не исключает более основной состав плагиоклазов протолита. Этот процесс (Pl<sub>82-83</sub> + H<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O  $\rightarrow$  слюды + Pl<sub>63-65</sub>) происходил с участием, вероятно, привнесенных воды и щелочей. Часть Na<sub>2</sub>O, высвобождавшаяся при деанортитизации плагиоклазов, по-видимому, способствовала изменению в ходе развития процесса активности щелочей от K к Na. Постепенное увеличение в фенгитах содержания Si = 3,15–3,27 к. ф., вероятно, определяет прогрессивный высокобарический характер метаморфического тренда.

На следующей стадии происходило образование цоизитов (Pl<sub>83-63</sub> + слюды + H<sub>2</sub>O  $\rightarrow$  Zo I + Qtz + K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) – сначала отдельных мелких кристаллов, возможно, совместно со слюдяным компонентом с последующим образованием мономинеральных среднезернистых цоизититов с прогрессивным увеличением в их составе X<sub>Ps</sub> = 0,10  $\rightarrow$  0,17. Кварц в основном подвергался сегрегации с образованием кварцсодержащих цоизититов или кварцевых прожилков с цоизитом. Встречаемые в массе основных плагиоклазов мелкие неправильной формы образования KFs, возможно, сформировались за счет выделившегося при реакции K<sub>2</sub>O.

Ретроградные процессы происходили в течение двух дискретных этапов. Первый отмечен образованием Pl<sub>63-65</sub>, Zo II, повсеместно в виде Zo-Qtz симплектитов (рис. 7, г) при реакции Pl<sub>65</sub> + H<sub>2</sub>O + CaO  $\rightarrow$  Zo<sub>0,10</sub> + Qtz  $\pm$  Ep + Na<sub>2</sub>O и Di + H<sub>2</sub>O + SiO<sub>2</sub>  $\rightarrow$  Tr + CaO в участках, содержащих Di. Кварц в основном кристаллизуется in situ – в симплектитовых срастаниях с Zo II.

Для второго ретроградного этапа характерны парагенезисы Zo III – Ab и Zo III – Ab – Ms II при соответствующих реакциях: Pl<sub>65</sub> + H<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O  $\rightarrow$  Zo<sub>0,08</sub> + Ab и Pl<sub>65</sub> + H<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O  $\rightarrow$  Zo<sub>0,10</sub> + Ab + Ms.

Определение P-T условий метаморфизма цоизититов является сложной задачей. Единственная возможность – использование геотермобарометра А. Брунсмманна и др. [Brunsmann et al., 2002], основанного на результатах экспериментальных исследований в системе CaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (CFASH), целью которых было изучение фазовых равновесий «цоизит – клиноцоизит». По заключению авторов, приблизительный минимум P-T условий образования цоизита может быть определен и в породах, не содержащих клиноцоизита, по уравнению X<sub>Ps</sub><sup>max</sup> = 1,9 \* 10<sup>-4</sup> T + 3,1 \* 10<sup>-2</sup> P – 5,36 \* 10<sup>-2</sup> ( $\Delta T = \pm 50$  °C,  $\Delta P = \pm 0,3$  GPa) при

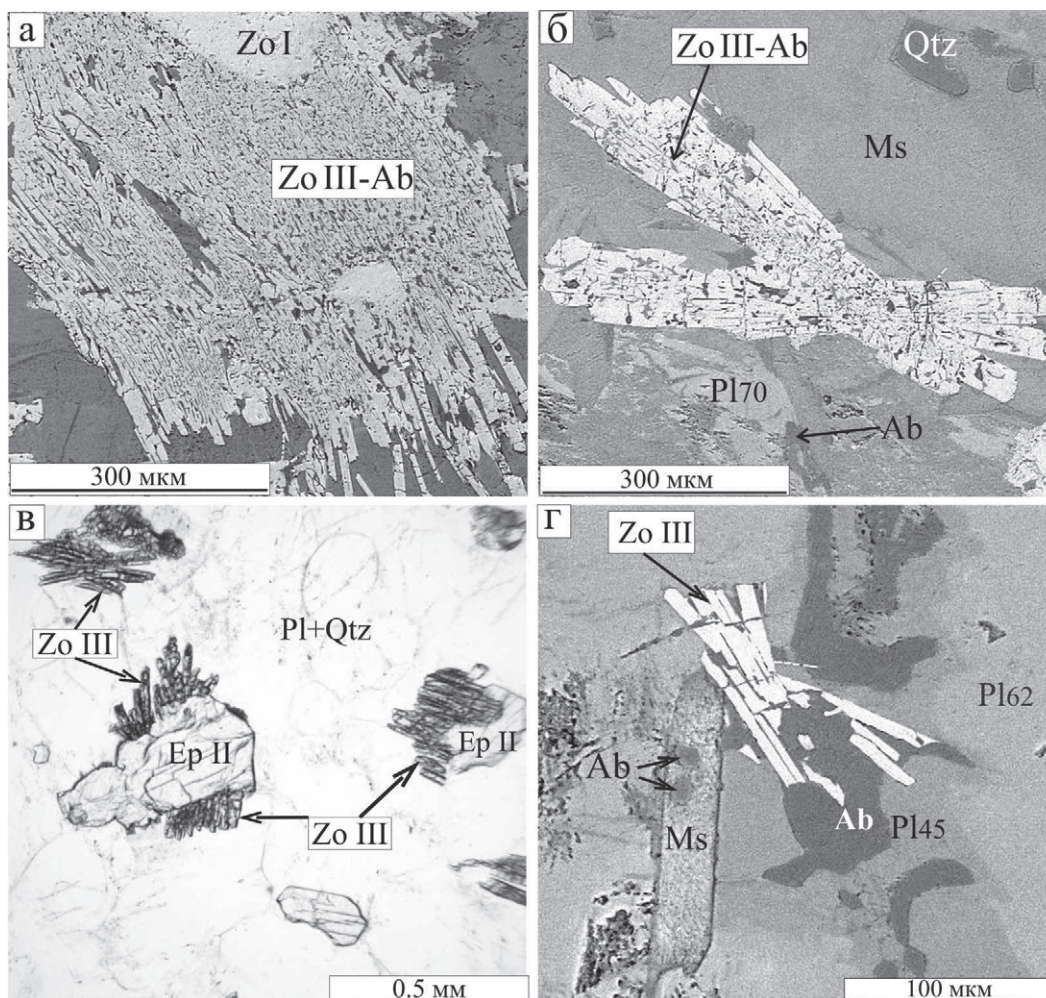


Рис. 8. Минерализация второго этапа ретроградных преобразований:

а – образование мелкоагрегатного Zo III по Pl в краевых частях кристаллов Zo I (шл. 258–3); б – X-образная форма кристаллов Zo III (Ab-Zo симплектиты) в реликтовой плагиоклазовой ( $Pl_{70}$ ) матрице с новообразованиями Ab, Ms, Qtz (шл. 258–4); в – образованные по Pl кристаллы Zo III на границах кристаллов Ep II (шл. 746–3, без анализатора); г – парогенезис Zo III–Ms II–Ab в меняющей состав (62→45→10 % An) плагиоклазовой матрице (шл. 1603–1). Изображения в отраженных электронах (а, б, г)

Fig. 8. Mineralization at the second stage of retrograde metamorphism:

а – formation of fine-aggregate Zo III after Pl on Zo I crystal margins (thin section 258–3); б – X-shaped Zo III crystals (Ab-Zo symplectites) in relict plagioclase ( $Pl_{70}$ ) matrix with newly-formed Ab, Ms and Qtz (thin section 258–4); в – Zo III crystals formed after Pl on Ep II crystal margins (thin section 746–3, without analyzer); г – paragenesis Zo III–Ms II–Ab in plagioclase matrix, which changes its composition (62→45→10 % An) (thin section 1603–1). Images in reflected electrons (а, б, г)

известных значениях одного из параметров [Brunsmann et al., 2002].

Поскольку прямыми данными о температурах образования цоизитов разных генераций мы не располагали, используются результаты определения температур образования акцессорных минералов – рутилов и титанитов (Zr-геотермометры [Watson et al., 2006a, б]), которые, по данным минералогического и петрографического изучения цоизитов и эклогитов, кристаллизуются в парогенезисе с породообразующими минералами разных этапов

метаморфической эволюции. В процессе прогрессивной стадии метаморфизма цоизитов эти минералы образовались в температурном интервале 590–820 °C (табл. 5, 6). При содержании в цоизитах  $Fe^{3+}$  от 0,10 до 0,17 к. ф. давление при этих температурах соответствует  $\geq 13,0 \rightarrow \geq 23,5$  кбар (рис. 10) – эклогитовой фации метаморфизма.

Если предположить, что и при образовании фенгитов температуры соответствовали этому интервалу, то использование эмпирического фенгитового геобарометра, основанного



Минералы Minerals	Протолит Protolite	НР-амфиболитовая — эклогитовая фации HP-amphibolite — eclogite facies	Постэклогитовые этапы Post-eclogite stages	
			I	II
Плагиоклаз Plagioclase	≥ 82-83% An	83-65% An	63-65% An	Ab (0-10% An)
Диопсид Diopside				
Цоизит Zoisite				
Фенгит Phengite				
Мусковит Muscovite				
Кварц Quartz				
Клиноцоизит- эпидот Clinzoisite- epidote				
Титанит Titanite	.....			
Рутил Rutile	.....			
Тремолит Tremolite				

Рис. 9. Минеральные ассоциации в цоизититах Гридинской структуры, связанные с разными этапами их истории

Fig. 9. Mineral assemblages in zoisitites of the Gridino structure related to the different stages of their history

Таблица 5. Температуры образования рутилов из цоизититов (обр. 258–4) Гридинского комплекса по Zr-геотермометру [Watson et al., 2006a]

Table 5. Rutile formation temperatures from zoisitites (sample 258–4) from the Gridino complex, calculated by Zr-geothermometer [Watson et al., 2006a]

Компонент Component	II-2	I-8	I-3	I-5	I-14	I-13	I-7	II-10	II-5	I-11
Zr, ppm	148,4	156,3	368,9	456,9	805	926	1008	1357	1753	1806
T, °C	589	592	660	678	730	744	753	784	813	816

Примечание. I, II – две группы исследованных рутилов.

Note. I, II – two groups of the investigated rutiles.

Таблица 6. Температуры образования титанитов из цоизититов (обр. 258–4) Гридинского комплекса по Zr-геотермометру [Watson et al., 2006b]

Table 6. Titanite formation temperatures from zoisitites (sample 258–4) from the Gridino complex, calculated by Zr-geothermometer [Watson et al., 2006b]

№ ан. Analysis no.	Концентрация Concentration Zr, ppm	Log Zr (ppm)	T, °C
12	123,9	2,09	771
5	166,2	2,22	786
7	181,8	2,26	790
3	246,5	2,39	806
1	371,4	2,57	828

на принципе мономинеральной геобарометрии [Камзолкин и др., 2015], определяет давление 9–22,8 кбар, что соответствует тренду НР-амфиболитовой – эклогитовой фаций. Значения интервала 9–13 кбар в этом случае, возможно, отражают начальные условия образования мусковитов (Ms I) и фенгитов до времени образования цоизита. Предполагаемые P-T условия ретроградных процессов соответствуют: 1) при  $Zo_{0,10}$  – T ~ 600 °C, P ~ 13 кбар и 2) при  $Zo_{0,08}$  – T ~ 570 °C, P ~ 8 кбар (рис. 10).

**Протолит.** Цоизититы на о. Цоизититовом в крупных (60×10 м) и мелких телах в основном имеют однородный цоизитовый состав с ре-

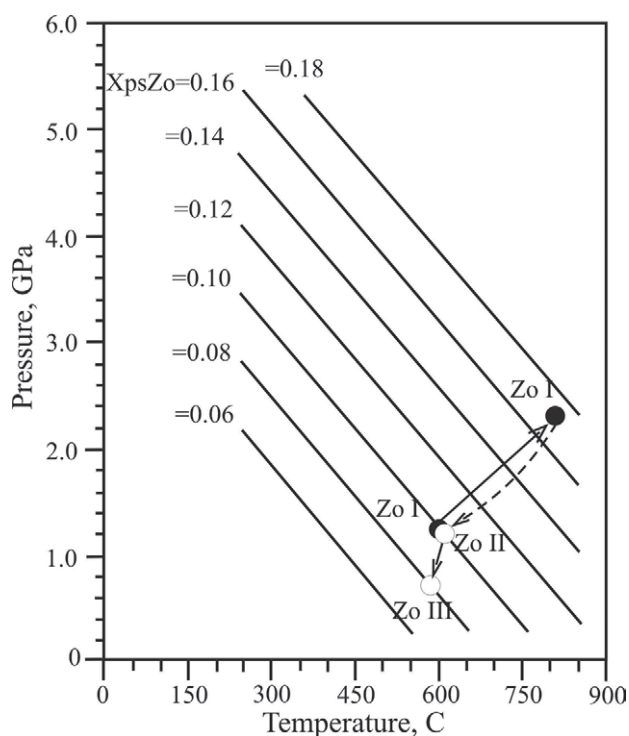


Рис. 10. P-T условия образования цоизитов на проградном и ретроградных этапах (на основе геотермобарометра [Brunsmann et al., 2002])

Fig. 10. P-T conditions of the zoisite formation at prograde and retrograde stages (estimated using a geothermobarometer [Brunsmann et al., 2002])

ликтовым ранним плагиоклазом ( $\geq 82-83\%$  An). Локально в небольшом количестве в них встречается диопсид, как правило, амфиболизированный (рис. 7, в). Ассоциация этих минералов позволяет предполагать, что протолитом цоизититов, вероятно, могут быть анортозиты, образующие метаморфизованные фрагменты дифференциального комплекса габбро-анортозитов.

Показательным в этом плане может быть сравнительное сходство схем распределения редких земель (рис. 3, а) и особенно редких элементов (рис. 3, б) в анортозитах на примере анортозита (Pl 80% An) из расслоенного анортозитового комплекса Нааят Кууэт (Naajat Kuuat), Западная Гренландия [Hoffman et al., 2012], и в цоизититах и цоизитах р-на с. Гридино. Отличия заключаются только в количественном содержании микроэлементов и в положительной Eu-аномалии в анортозите, как и в Pl-содержащем цоизитите (обр. 1603-2а, рис. 3, табл. 1). Относительное обогащение редкоземельными и редкими элементами, по-видимому, связано с их привнесом вместе с водой и щелочами в процессе образования слюд с последующим их перераспределением при образовании цоизитов.

Предполагаемые габбро-анортозитовые дифференциаты, к сожалению, интенсивно преобразованные, являются обычным компонентом обломочного комплекса в гранитоидной матрице Гридинского комплекса. В подобной породе четко полосчатого строения на о. Столбиха в лейкократовой части устанавливается наиболее ранняя диопсид-плагиоклазовая (Pl<sub>93-94</sub>) магматическая (?) ассоциация. Также реликтовые признаки эклогитового метаморфизма представлены гранатом (20% Prp, 31% Grs) с многочисленными включениями Zo<sub>0.15-0.16</sub> и, как в цоизититах, развивающимися по Pl<sub>83-86</sub> фенгитом (Si = 3,27 к. ф.) и цоизитом. Основной интенсивно проявленный метаморфизм представлен ассоциацией Grt-Cpx-Amph-Vt-Pl<sub>43-50</sub>. Признаками раннего омфацита являются ориентированные и субориентированные Cpx-Pl симплектиты. Собственно омфацит (28% Jd) был обнаружен только во включении в гранате в меланократовой полосе, сложенной амфиболизированными симплектитовыми апо-эклогитами [Maksimov et al., 2019].

**Возраст.** При U-Pb датировании цирконов из цоизититов о. Цоизититового в северной части наиболее крупного тела (рис. 2, табл. 1, ан. GR10-6/2) получены 45 конкордантных и субконкордантных изотопных возрастов в 26 зернах цирконов. Результаты датирования показали вариации возрастов от 3,0 до 1,9 млрд лет. При этом выделяются 6 групп с возрастными 3,0; 2,9; 2,82; 2,75; 2,72; 1,96 млрд лет [Слабунов и др., 2015].

Комплексное изучение морфологии и геохимии цирконов, а также минеральных включений в них послужило основанием для оценки вероятных условий образования каждой из этих групп [Слабунов и др., 2015]. Цирконы наиболее ранних групп (3,0; 2,9; 2,82 млрд лет), по-видимому, являются ксеногенными, захваченными из пород рамы при формировании анортозитового или габбро-анортозитового массива. Идиоморфные и субидиоморфные зональные, очевидно, магматические цирконы с возрастом  $2745 \pm 8$  млн лет являются наиболее приемлемыми для их соответствия возрасту протолита цоизититов – анортозита. Конкордантный возраст  $2719 \pm 8$  млн лет округлой и овальной форм метаморфических цирконов соответствует времени образования цоизититов в условиях эклогитовой фации, а группа цирконов с возрастом  $2678,9 \pm 10$  млн лет [Слабунов и др., 2015] – предположительно, времени I этапа ретроградных преобразований (Zo II – P ~ 12 кбар, T ~ 600 °C).

Цирконы палеопротерозойского возраста, проявленные только в форме зон обра-

стания архейских цирконов (светлые в CL-изображениях), не получили корректных возрастных датировок из-за больших погрешностей определений ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$   $2065 \pm 936$  и  $1987 \pm 923$  млн лет), обусловленных крайне низким содержанием U, Th, Pb, REE (условное конкордантное определение  $1960 \pm 130$  млн лет [Слабунов и др., 2015]).

### Обсуждение результатов и выводы

Цоизиты занимают одинаковое с эклогитами геологическое положение – в составе обломочного компонента в разгнейсованной гранитоидной матрице. Являются ли эти породы фациальными аналогами при отсутствии в цоизититах кианита, ожидаемого при реакции образования цоизита по анортиту?

На ранней стадии прогрессивного метаморфизма анортозитового протолита по основному плагиоклазу происходило образование мусковитов (Ms I) и фенгитов с содержанием Si = 3,15–3,27 к. ф.

На второй стадии прогрессивного метаморфизма при практически полном замещении минералов ранних ассоциаций шло образование цоизитов ( $\text{Pl}_{83-63} + \text{слюды} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Zo I} + \text{Qtz} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ) с прогрессивно возрастающим содержанием  $X_{\text{Ps}} = 0,10 \rightarrow 0,17$ . Вероятно, присутствие слюдяной минерализации в качестве сопутствующего реагента предопределило преобразование An в Zo без участия Ku и Grs.

Проблемной остается временная интерпретация слюдяной и цоизитовой минерализаций – дискретной во времени их образования или интегральной с начальной слюдяной (9–13 кбар) и конечной мономинеральной цоизитовой ассоциацией.

Использование геотермобарометра [Brunsmann et al., 2002], основанного на интерпретации экспериментальных данных в системе цоизит-клиноцоизит, и Zr-геотермометров [Watson et al., 2006а, б] дало возможность определить вероятные P-T условия их кристаллизации ( $\geq 13$  кбар/590 °C  $\rightarrow \geq 23,5$  кбар/820 °C), соответствующие эклогитовой фаши метаморфизма.

Соответствие цоизитов прогрессивного тренда метаморфизма эклогитовой фаши подтверждается также наблюдаемыми в шлифах эклогитов о. Избная Луда и участка Самылино обособлениями, сложенными парагенетическими с эклогитовыми ассоциациями цоизитами совместно с мусковитом, фенгитом и реликтовыми (?) плагиоклазами (85–95 % An).

Анортозитовый протолит цоизититов, вероятно, является фрагментом дифференцированного массива габбро-анортозитов, пред-

полагаемые обломки которого неоднократно устанавливались в Гридинском эклогитосодержащем комплексе. Наиболее вероятным их аналогом представляются полосчатые амфиболлизированные ретроградно преобразованные симплектитовые эклогиты о. Столбиха. Помимо минералого-петрологических признаков (реликтовые анортиты, цоизиты, фенгиты) сопоставимыми являются их возрастные датировки. Возраст эклогитов и их ретроградных преобразований – 2,72–2,65 млрд лет [Володичев и др., 2004]; 2,70–2,65–2,61 млрд лет [Li et al., 2015]; 2,71–2,68 млрд лет [Balagansky et al., 2019]. Возраст цоизититов и их ретроградных преобразований – от 2,72–2,68 до 2,62 млрд лет [Слабунов и др., 2015]. Возраст предполагаемого магматического протолита эклогитов 2,75–2,76 млрд лет [Li et al., 2015]; цоизититов ~ 2,75 млрд лет [Слабунов и др., 2015]. Возраст ретроградных преобразований сопоставим с возрастом второй стадии [Volodichev, 2014] архейской коллизии в породах Беломорской провинции (HP-метаморфизм кианит-ортоклазовой субфаши [Володичев, 1990]) –  $2691 \pm 15$  млн лет [Левченков и др., 2001] и  $2678 \pm 31$  млн лет [Слабунов и др., 2016].

Преобладание в составе обломочного компонента плутонических пород разнообразного состава (двупироксеновые, клинопироксеновые и ортопироксеновые пироксениты, габбро-нориты, габбро-анортозиты, анортозиты и др.) позволяет предполагать, что их эклогитизация происходила в режиме коллизии. Эти породы могут быть эклогитизированными нижнекоровыми образованиями, эксгумированными в декомпрессионном канале, сформированном в процессе образования континентальной трансензионной глубинной зоны [Володичев, Кузенко, 2013; Volodichev, 2014].

*Авторы выражают искреннюю благодарность П. Я. Азимову за детальное и во многом критическое обсуждение полученных результатов, а также А. И. Слабунову за высказанные замечания и рекомендации.*

*Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН).*

### Литература

Бибикова Е. В., Слабунов А. И., Володичев О. И., Кузенко Т. И., Конилов А. Н. Изотопно-геохимическая характеристика архейских эклогитов и глиноземистых гнейсов Гридинской зоны тектонического

меланжа Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит) // Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза: Матер. II Рос. конф. по изотопной геохронологии. СПб., 2003. С. 68–71.

Володичев О. И. Беломорский комплекс Карелии (геология и петрология). Л.: Наука, 1990. 245 с.

Володичев О. И., Слабунов А. И., Бибикина Е. В., Конилов А. Н., Кузенко Т. И. Архейские эклогиты Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит) // Петрология. 2004. Т. 12, № 6. С. 609–631.

Володичев О. И., Слабунов А. И., Сибелев О. С., Скублов С. Г., Кузенко Т. И. Геохронология, минеральные включения и геохимия цирконов из эклогитизированных габброноритов Беломорской провинции (с. Гридино) // Геохимия. 2012. № 8. С. 734–748.

Володичев О. И., Кузенко Т. И. Прогрэдные и ретроградные тренды эволюции метаморфизма архейских эклогитов и их геодинамическая интерпретация (Карелия, район с. Гридино) // Записки РМО. 2013. № 3. С. 28–51.

Володичев О. И., Максимов О. А. Гридинский неоархейский эклогитсодержащий комплекс: проблемы геодинамики, образования и развития // Геодинамика раннего докембрия: сходства и различия с фанерозоем: Матер. науч. конф. и путеводитель науч. экскурсий. Петрозаводск, 2017. С. 58–60.

Камзолкин В. А., Иванов С. Д., Конилов А. Н. Эмпирический фенгитовый геобарометр: обоснование, калибровка и применение // Записки РМО. 2015. № 5. С. 1–14.

Левченков О. А., Володичев О. И., Зингер Т. Ф., Яковлева С. З., Макеев А. Ф., Шулешко И. К., Кевлич В. И. Возраст метаморфизма глиноземистых гнейсов района губы Поньгома (Беломорский подвижный пояс, Балтийский щит) // ДАН. 2001. Т. 377, № 2. С. 235–238.

Максимов О. А. Метаморфическая эволюция пироксенитов Гридинского эклогитсодержащего комплекса (остров Прянишная луда) // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 320–328.

Сибелев О. С., Гоголев М. А., Максимов О. А. Геологическая позиция и условия формирования метаэндербитов Гридинской зоны эклогитсодержащего меланжа (Беломорский подвижный пояс) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 16. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 5–20.

Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 296 с.

Слабунов А. И., Володичев О. И., Скублов С. Г., Березин А. В. Главные стадии формирования палеопротерозойских эклогитизированных габброноритов по результатам U-Pb (SHRIMP) датирования цирконов и изучения их генезиса // ДАН. 2011. Т. 437, № 2. С. 238–242.

Слабунов А. И., Азимов П. Я., Глебовицкий В. А., Жанг Л., Кевлич В. И. Архейская и палеопротерозойская мигматизация пород Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: петрология, геохронология, геодинамические следствия

// ДАН. 2016. Т. 467, № 1. С. 71–74. doi: 10.7868/S0869565216070239

Слабунов А. И., Володичев О. И., Ли Сяоли, Максимов О. А. Архейские коизититы Гридинского эклогитсодержащего меланжа (Беломорская провинция Фенноскандинавского щита): геология, U-Pb возраста цирконов и геодинамические следствия // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 7. С. 85–106. doi: 10.17076/geo121

Скублов С. Г., Астафьев Б. Ю., Марин Ю. Б., Березин А. В., Мельник А. Е., Пресняков С. Л. Новые данные о возрасте эклогитов Беломорского подвижного пояса в районе с. Гридино // ДАН. 2011. Т. 439, № 6. С. 795–802.

Степанов В. С., Степанова А. В. Раннепротерозойские метагаббро района с. Гридино (Беломорский подвижный пояс) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 55–71.

Armbruster T., Bonazzi P., Akasaka M., Bernanec V., Chopin C., Gieré R., Heuss-Assbichler S., Liebscher A., Menchetti S., Pan Y., Pasero M. Recommended nomenclature of epidote-group minerals // Eur. J. Mineral. 2006. Vol. 18. P. 551–567.

Balagansky V. V., Maksimov O. A., Gorbunov I. A., Kartushinskaya T. V., Mudruk S. V., Sidorov M. Yu., Sibelev O. S., Slabunov A. I. Older and younger eclogites in the Belomorian province, Fennoscandian Shield: an example from the Gridino area // Abs. Vol. of the 13<sup>th</sup> Int. Eclogite Conf. Petrozavodsk, 2019. P. 10.

Berman R. G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique, with petrological applications // Can. Mineral. 1991. Vol. 29, no. 4. P. 833–855.

Bird D., Spieler A. R. Epidote in Geothermal Systems // Rev. Mineral. Geochem. 2004. Vol. 56. P. 235–300.

Brunsmann A., Franz G., Heinrich W. Experimental investigation of zoisite-clinozoisite phase equilibria in the system CaO – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O // Contr. Miner. Petrol. 2002. Vol. 143. P. 115–130.

Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. Rock-forming minerals. Vol. 1B. Disilicates and Ring Silicates. Geol. Society, London, 1997. 629 p.

Dokukina K. A., Bayanova T. B., Kaulina T. V., Travina A. V., Mints M. V., Konilov A. N., Serov P. A. The Belomorian eclogite province: sequence of events and age of the igneous and metamorphic rocks of the Gridino association // Russ. Geol. Geophys. 2012. Vol. 53. P. 1023–1054. doi: 10.1016/j.rgg.2012.08.006

Enami N., Banno S. Zoisite-clinozoisite relations in low- to medium-grade high-pressure rocks and their implications // Miner. Mag. 1980. Vol. 43. P. 1005–1013. doi: 10.1180/minmag.1980.043.332.08

Enami M., Liou J. G., Mattinson C. G. Epidote minerals in high P/T metamorphic terranes: Subduction zone and high- to ultrahigh-pressure metamorphism // Rev. Mineral. Geochem. 2004. Vol. 56. P. 347–398.

Evans B. W. Phase relations of epidote-blueschists // Lithos. 1990. Vol. 25. P. 3–23.

Franz G., Liebscher A. Physical and chemical properties of the epidote minerals – An Introduction // Rev. Mineral. Geochem. 2004. Vol. 56. P. 1–82.

Franz G., Selverstone J. An empirical phase diagram for the clinozoisite-zoisite transformation in the system

$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH}) - \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Fe}^{3+}\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$  // Amer. Miner. 1992. Vol. 77. P. 631–642.

Franz G., Smelik E. A. Zoisite-clinozoisite bearing pegmatites and their importance for decompressional melting in eclogites // Eur. J. Mineral. 1995. Vol. 7. P. 1421–1436.

Grapes R. H., Hoskin P. W. O. Epidote group minerals in low – medium pressure metamorphic terranes // Rev. Mineral. Geochem. 2004. Vol. 56. P. 301–345.

Herms P., John T., Bakker R. J., Schenk V. Evidence for channelized external fluid flow and element transfer in subducting slabs (Raspas Complex, Ecuador) // Chem. Geol. 2012. Vol. 310–311. P. 79–96. doi: 10.1016/j.chemgeo.2012.03.023

Herwartz D., Skublov S. G., Berezin A. V., Mel'nik A. E. First Lu-Hf garnet ages of eclogites from the Belomorian Mobile Belt (Baltic Shield, Russia) // Dokl. Earth Sci. 2012. Vol. 443. Part 1. P. 377–380. doi: 10.1134/S1028334X12030130

Hofmann A. W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust and oceanic crust // Earth and Planet Sci. Lett. 1988. Vol. 90. P. 297–314.

Hoffmann J. E., Svahnberg H., Piazzolo S., Scherstén A., Münker C. The geodynamic evolution of Mesoproterozoic anorthosite complexes inferred from the Naajat Kuuat Complex, southern West Greenland // Precambrian Res. 2012. Vol. 196–197. P. 149–170. doi: 10.1016/j.precamres.2011.12.002

Korsakov A. V., Shatsky V. S., Sobolev N. V., Zayachkovsky A. A. Garnet-biotite-clinozoisite gneisses: a new type of diamondiferous metamorphic rocks of the Kokchetav massif // European J. Miner. 2002. Vol. 14. P. 915–929.

Klemd R. Fluid inclusions in epidote minerals and fluid development in epidote-bearing rocks // Rev. Mineral. Geochem. 2004. Vol. 56. P. 197–234.

Kretz R. Symbols for rock-forming mineral // Amer. Miner. 1983. Vol. 68. P. 277–279.

Li X., Zhanga L., Wei C., Slabunov A. I. Metamorphic PT path and zircon U-Pb dating of Archean eclogite association in Gridino complex, Belomorian province, Russia // Precambrian Res. 2015. Vol. 268. P. 74–96. doi: 10.1016/j.precamres.2015.07.009

Liebscher A., Franz G., Frei D., Dulski P. High-pressure melting of eclogite and the P-T-X history of tonalitic to trondhjemitic zoisite-pegmatites, Münchberg Massif, Germany // J. Petrol. 2007. Vol. 48, no. 5. P. 1001–1019.

Maksimov O. A., Slabunov A. I., Balagansky V. V., Volodichev O. I. Archean eclogites from the Belomo-

rian Province (examples from the Gridino area) // Abs. Vol. of the 13<sup>th</sup> Int. Eclogite Conf. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2019. P. 54.

Nicollet C., Leyreloup A., Dupuy C. Petrogenesis of high pressure trondhjemitic layers in eclogites and amphibolites from Southern Massif Central, France // Trondhjemitic, Dacites, and Related Rocks / Ed. F. Barker. Amsterdam: Elsevier, 1979. P. 435–463.

Perchuk A. L., Morgunova A. A. Variable P-T paths and HP-UHP metamorphism in a Precambrian terrane, Gridino, Russia: petrological evidence and geodynamic implications // Gondwana Res. 2014. Vol. 25. P. 614–629. doi: 10.1016/j.gr.2012.09.009

Prunier A. R., Hewitt D. A. Experimental observations on coexisting zoisite-clinozoisite // Amer. Miner. 1985. Vol. 70. P. 375–378.

Schmidt M. W., Poli S. Magmatic epidote // Rev. Mineral. Geochem. 2004. Vol. 56. P. 399–430.

Taylor S. R., McLennan S. M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford: Blackwell, 1985. 312 p.

Volodichev O. I. Evolution of metamorphic processes in the Belomorian Mobile Belt // Precambrian high-grade mobile belts: extended abs. Petrozavodsk, 2014. P. 115–116.

Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // Contr. Miner. Petrol. 2006a. Vol. 151. P. 413–433.

Watson E. B., Hayden L. A., Wark D. A., Cherniak D. J., Thomas J. B., Manchester J. E. New crystallization thermometers for zircon, rutile and sphene; calibrations, diffusion considerations, and applications // Northeastern Section – 41<sup>st</sup> Annual Meeting: abs. with Programs. Geol. Society of America. 2006b. Vol. 38, no. 2. P. 5.

Yu H. L., Zhang L. F., Wei C. J., Li X. L., Guo J. H. Age and P-T conditions of the Gridino eclogite in the Belomorian Province, Russia // J. Metamorph. Geol. 2017. Vol. 35. P. 855–869. doi: 10.1111/jmg.12258

Zhang R. Y., Liou J. G. Coesite-bearing eclogite in Henan Province, central China: detailed petrography, glaucophane stability and PT-path // Eur. J. Mineral. 1994. Vol. 6. P. 217–233.

Zhang R. Y., Liou J. G., Ernst W. G., Coleman R. G., Sobolev N. V., Shatsky V. S. Metamorphic evolution of diamond-bearing and associated rocks from the Kokchetav Massif, northern Kazakhstan // J. Metamorph. Geol. 1997. Vol. 15. P. 479–496.

Поступила в редакцию 18.12.2019

## References

Bibikova E. V., Slabunov A. I., Volodichev O. I., Kuzenko T. I., Konilov A. N. Izotopno-geokhimicheskaya kharakteristika arkheiskikh eklogitov i gliozemistykh gneisov Gridinskoi zony tektonicheskogo melanzha Belomorskogo podvizhnogo poyasa (Baltiiskii shchit) [Isotopic-geochemical characteristics of the Archean eclogites and aluminous gneisses of the Gridino Zone of the tectonic melange of the Belomorian Mobile Belt (Baltic Shield)]. *Izotopnaya geokhronologiya v reshenii problem geodinamiki i rudogeneza*: Mater. II Ross. konf.

po izotopnoi geokhronologii [Isotope geochronology in solving the problems of geodynamics and ore genesis: Proceed. II Russ. conf. on isotope geochronology]. St. Petersburg, 2003. P. 68–71.

Kamzolkin V. A., Ivanov S. D., Konilov A. N. Empiricheskiy fengitoviy geobarometr: obosnovanie, kalibrovka i primenenie [Empirical phengitic geobarometer: substantiation, calibration, and practical application]. *Zapiski RMO* [Proceed. RMS]. 2015. No. 5. P. 1–14.

Levchenkov O. A., Volodichev O. I., Zinger T. F., Yakovleva S. Z., Makeev A. F., Shuleshko I. K., Kevlich V. I. Vozrast metamorfizma glinozemykh gneisov raiona guby Pon'goma (Belomorskii podvizhnyi po-yas, Baltiiskii shchit) [Metamorphism age of aluminous gneisses of Pangoma Bay (Belomorian Mobile Belt, Baltic Shield)]. *DAN* [Proceed. RAS]. 2001. Vol. 377, no. 2. P. 235–238.

Maksimov O. A. Metamorficheskaya evolyutsiya piroksenitov Gridinskogo eklogitsoderzhashchego kompleksa (ostrov Pryanishnaya luda) [Metamorphic evolution of pyroxenites from the Gridino eclogite-bearing complex (Pryanishnaya Luda Island)]. *Vestnik MGTU* [Vestnik MSTU]. 2014. Vol. 17, no. 2. P. 320–328.

Sibelev O. S., Gogolev M. A., Maksimov O. A. Geologicheskaya pozitsiya i usloviya formirovaniya metaenderbitov Gridinskoj zony eklogitsoderzhashchego melanzha (Belomorskii podvizhnyi po-yas) [Geological position and conditions of formation of metaenderbites in the Gridino Zone of eclogite-bearing mélangé, Belomorian Mobile Belt]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 16. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. P. 5–20.

Slabunov A. I. Geologiya i geodinamika arheiskikh podvizhnykh po-yasov (na primere Belomorskoi provintsii Fennoskandinavskogo shchita) [Geology and geodynamics of the Archean Mobile Belts exemplified on the Belomorian Province of the Fennoscandian Shield]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2008. 296 p.

Slabunov A. I., Volodichev O. I., Skublov S. G., Berezin A. V. Main stages of the formation of Paleoproterozoic eclogitized gabbro-norite: Evidence from U-Pb (SHRIMP) dating of zircons and study of their genesis. *DAN* [Dokl. Earth Sci.]. 2011. Vol. 437. P. 396–400.

Slabunov A. I., Azimov P. Ya., Glebovitskii V. A., Zhang L., Kevlich V. I. Archean and Palaeoproterozoic migmatizations in the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: Petrology, Geochronology, and Geodynamic Settings. *DAN* [Dokl. Earth Sci.]. 2016. Vol. 467, no. 1. P. 259–263. doi: 10.1134/S1028334X16030077

Slabunov A. I., Volodichev O. I., Li Siaoli, Maksimov O. A. Arkheiskie tsoizitity Gridinskogo eklogitsoderzhashchego melanzha (Belomorskaya provintsiya Fennoskandinavskogo shchita): geologiya, U-Pb vozrasty tsirkonov i geodinamicheskie sledstviya [Archean zoisites of the Gridino eclogite-bearing mélangé, Belomorian province of the Fennoscandian Shield: geology, U-Pb zircon ages and geodynamic setting]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2015. No. 7. P. 85–106. doi: 10.17076/geo121

Skublov S. G., Astaf'ev B. Yu., Berezin A. V., Marin Yu. B., Mel'nik A. E., Presnyakov S. L. New data on the age of eclogites from the Belomorian Mobile Belt at Gridino settlement area. *DAN* [Dokl. Earth Sci.]. 2011. Vol. 439. P. 1163–1170.

Stepanov V. S., Stepanova A. B. Ranneproterozoiskie metagabbro raiona s. Gridino (Belomorskii podvizhnyi po-yas) [Early Proterozoic metagabbro from the Gridino area, Belomorian Mobile Belt]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 9. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2006. P. 55–71.

Volodichev O. I. Belomorskii kompleks Karelii (geologiya i petrologiya) [The Belomorian complex of Kare-

lia (geology and petrology)]. Leningrad: Nauka, 1990. 248 p.

Volodichev O. I., Slabunov A. I., Bibikova E. V., Konilov A. N., Kuzenko T. I. Archean eclogites in the Belomorian Mobile Belt, Baltic Shield. *Petrology*. 2004. Vol. 12, no. 6. P. 540–560.

Volodichev O. I., Slabunov A. I., Sibelev O. S., Skublov S. G., Kuzenko T. I. Geochronology, mineral inclusions, and geochemistry of zircons in eclogitized gabbro-norites in the Gridino Area, Belomorian Province. *Geochem. Int.* 2012. Vol. 50, no. 8. P. 657–670.

Volodichev O. I., Kuzenko T. I. Progradnye i retrogradnye trendy evolyutsii metamorfizma arheiskikh eklogitov i ikh geodinamicheskaya interpretatsiya (Kareliya, raion s. Gridino) [Prograde and retrograde trends in evolution of Archean eclogites metamorphism and their geodynamic interpretation (Karelia, Gridino village area)]. *Zapiski RMO* [Proceed. RMS]. 2013. No. 3. P. 28–51.

Volodichev O. I., Maksimov O. A. Gridinskii neoarkheiskii eklogitsoderzhashchii kompleks: problemy geodinamiki, obrazovaniya i razvitiya [Neoproterozoic Gridino eclogite-bearing complex: Geodynamics, formation and evolution problems]. *Geodinamika rannego dokembriya: skhodstva i razlichiya s fanerozoem*: Mater. nauch. konf. i putevoditel' nauch. ekskursii [Early Precambrian vs modern geodynamics: Extended abs. and field trips guide book]. Petrozavodsk, 2017. P. 58–60.

Armbruster T., Bonazzi P., Akasaka M., Bermanec V., Chopin C., Gieré R., Heuss-Assbichler S., Liebscher A., Menchetti S., Pan Y., Pasero M. Recommended nomenclature of epidote-group minerals. *Eur. J. Mineral.* 2006. Vol. 18. P. 551–567.

Balagansky V. V., Maksimov O. A., Gorbunov I. A., Kartushinskaya T. V., Mudruk S. V., Sidorov M. Yu., Sibelev O. S., Slabunov A. I. Older and younger eclogites in the Belomorian province, Fennoscandian Shield: an example from the Gridino area // *Abs. Vol. of the 13<sup>th</sup> Int. Eclogite Conf.* Petrozavodsk: KarRC RAS, 2019. P. 10.

Berman R. G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique, with petrological applications // *Can. Mineral.* 1991. Vol. 29, no. 4. P. 833–855.

Bird D., Spieler A. R. Epidote in geothermal systems. *Rev. Mineral. Geochem.* 2004. Vol. 56. P. 235–300.

Brunsmann A., Franz G., Heinrich W. Experimental investigation of zoisite-clinozoisite phase equilibria in the system CaO – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O. *Contr. Miner. Petrol.* 2002. Vol. 143. P. 115–130.

Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. Rock-forming minerals. Vol. 1B. Disilicates and Ring Silicates. Geological Society, London, 1997. 629 p.

Dokukina K. A., Bayanova T. B., Kaulina T. V., Travin A. V., Mints M. V., Konilov A. N., Serov P. A. The Belomorian eclogite province: sequence of events and age of the igneous and metamorphic rocks of the Gridino association. *Russ. Geol. Geophys.* 2012. Vol. 53. P. 1023–1054. doi: 10.1016/j.rgg.2012.08.006

Enami N., Banno S. Zoisite-clinozoisite relations in low- to medium-grade high-pressure rocks and their implications. *Miner. Mag.* 1980. Vol. 43. P. 1005–1013. doi: 10.1180/minmag.1980.043.332.08

- Enami M., Liou J. G., Mattinson C. G. Epidote minerals in high P/T metamorphic terranes: subduction zone and high- to ultrahigh-pressure metamorphism. *Rev. Mineral. Geochem.* 2004. Vol. 56. P. 347–398.
- Evans B. W. Phase relations of epidote-blueschists. *Lithos.* 1990. Vol. 25. P. 3–23.
- Franz G., Liebscher A. Physical and chemical properties of the epidote minerals – An Introduction. *Rev. Mineral. Geochem.* 2004. Vol. 56. P. 1–82.
- Franz G., Selverstone J. An empirical phase diagram for the clinozoisite-zoisite transformation in the system  $\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH}) - \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Fe}^{3+}\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$ . *Amer. Miner.* 1992. Vol. 77. P. 631–642.
- Franz G., Smelik E. A. Zoisite-clinozoisite bearing pegmatites and their importance for decompressional melting in eclogites. *Eur. J. Mineral.* 1995. Vol. 7. P. 1421–1436.
- Grapes R. H., Hoskin P. W. O. Epidote group minerals in low – medium pressure metamorphic terranes. *Rev. Mineral. Geochem.* 2004. Vol. 56. P. 301–345.
- Hermes P., John T., Bakker R. J., Schenk V. Evidence for channelized external fluid flow and element transfer in subducting slabs (Raspas Complex, Ecuador). *Chem. Geol.* 2012. Vol. 310–311. P. 79–96. doi: 10.1016/j.chemgeo.2012.03.023
- Herwartz D., Skublov S. G., Berezin A. V., Mel'nik A. E. First Lu-Hf garnet ages of eclogites from the Belomorian Mobile Belt (Baltic Shield, Russia). *DAN [Dokl. Earth Sci.]*. 2012. Vol. 443. Part 1. P. 377–380. doi: 10.1134/S1028334X12030130
- Hofmann A. W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust and oceanic crust. *Earth Planet Sci. Lett.* 1988. Vol. 90. P. 297–314.
- Hoffmann J. E., Svahnberg H., Piazzolo S., Scherstén A., Münker C. The geodynamic evolution of Mesoproterozoic anorthosite complexes inferred from the Naajat Kuuat Complex, southern West Greenland. *Precambrian Res.* 2012. Vol. 196–197. P. 149–170. doi: 10.1016/j.precamres.2011.12.002
- Korsakov A. V., Shatsky V. S., Sobolev N. V., Zayachkovsky A. A. Garnet-biotite-clinozoisite gneisses: a new type of diamondiferous metamorphic rocks of the Kokchetav massif. *European J. Mineral.* 2002. Vol. 14. P. 915–929.
- Klemd R. Fluid inclusions in epidote minerals and fluid development in epidote-bearing rocks. *Rev. Mineral. Geochem.* 2004. Vol. 56. P. 197–234.
- Kretz R. Symbols for rock-forming mineral. *Amer. Miner.* 1983. Vol. 68. P. 277–279.
- Li X., Zhanga L., Wei C., Slabunov A. I. Metamorphic PT path and zircon U-Pb dating of Archean eclogite association in Gridino complex, Belomorian province, Russia. *Precambrian Res.* 2015. Vol. 268. P. 74–96. doi: 10.1016/j.precamres.2015.07.009
- Liebscher A., Franz G., Frei D., Dulski P. High-pressure melting of eclogite and the P-T-X history of tonalitic to trondhjemitic zoisite-pegmatites, Münchberg Massif, Germany. *J. Petrol.* 2007. Vol. 48, no. 5. P. 1001–1019.
- Maksimov O. A., Slabunov A. I., Balagansky V. V., Volodichev O. I. Archean eclogites from the Belomorian Province (examples from the Gridino area). *Abs. Vol. of the 13<sup>th</sup> Int. Eclogite Conf.* Petrozavodsk: KarRC RAS, 2019. P. 54.
- Nicollet C., Leyreloup A., Dupuy C. Petrogenesis of high pressure trondhjemitic layers in eclogites and amphibolites from Southern Massif Central, France. *Trondhjemitites, Dacites, and Related Rocks*. Ed. F. Barker. Elsevier, Amsterdam, 1979. P. 435–463.
- Perchuk A. L., Morgunova A. A. Variable P-T paths and HP-UHP metamorphism in a Precambrian terrane, Gridino, Russia: petrological evidence and geodynamic implications. *Gondwana Res.* 2014. Vol. 25. P. 614–629. doi: 10.1016/j.gr.2012.09.009
- Prunier A. R., Hewitt D. A. Experimental observations on coexisting zoisite-clinozoisite. *Amer. Miner.* 1985. Vol. 70. P. 375–378.
- Schmidt M. W., Poli S. Magmatic Epidote. *Rev. Mineral. Geochem.* 2004. Vol. 56. P. 399–430.
- Taylor S. R., McLennan S. M. *The Continental Crust: Its composition and evolution*. Oxford: Blackwell, 1985. 312 p.
- Volodichev O. I. Evolution of metamorphic processes in the Belomorian mobile belt. *Precambrian high-grade mobile belts: Extended Abs.* Petrozavodsk, 2014. P. 115–116.
- Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contr. Miner. Petrol.* 2006a. Vol. 151. P. 413–433.
- Watson E. B., Hayden L. A., Wark D. A., Cherniak D. J., Thomas J. B., Manchester J. E. New crystallization thermometers for zircon, rutile and sphene; calibrations, diffusion considerations, and applications. *Northeastern Section – 41<sup>st</sup> Annual Meeting. Abs. with Programs.* Geol. Society of America. 2006b. Vol. 38, no. 2. P. 5.
- Yu H. L., Zhang L. F., Wei C. J., Li X. L., Guo J. H. Age and P-T Conditions of the Gridino eclogite in the Belomorian Province, Russia. *Metamorph. Geol.* 2017. Vol. 35. P. 855–869. doi: 10.1111/jmg.12258
- Zhang R. Y., Liou J. G. Coesite-bearing eclogite in Henan Province, central China: detailed petrography, glaucophane stability and PT-path. *Eur. J. Mineral.* 1994. Vol. 6. P. 217–233.
- Zhang R. Y., Liou J. G., Ernst W. G., Coleman R. G., Sobolev N. V., Shatsky V. S. Metamorphic evolution of diamond-bearing and associated rocks from the Kokchetav Massif, northern Kazakhstan. *J. Metamorph. Geol.* 1997. Vol. 15. P. 479–496.

Received December 18, 2019

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Володичев Олег Иванович**

ведущий научный сотрудник лаб. геологии  
и геодинамики докембрия, д. г.-м. н.  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: volod@krc.karelia.ru  
тел.: +79215204240

### **Кузенко Татьяна Ивановна**

ведущий геолог лаб. геологии и геодинамики докембрия  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: volod@krc.karelia.ru

### **Максимов Олег Александрович**

младший научный сотрудник лаб. геологии  
и геодинамики докембрия  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: olemaximov@mail.ru  
тел.: +79210115129

## **CONTRIBUTORS:**

### **Volodichev, Oleg**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: volod@krc.karelia.ru  
tel.: +79215204240

### **Kuzenko, Tatyana**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: volod@krc.karelia.ru

### **Maksimov, Oleg**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: olemaximov@mail.ru  
tel.: +79210115129



УДК 552.48; 552.31 (234.851)

## ГЕОХИМИЯ АМФИБОЛИТОВ ХАРБЕЙСКОГО ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО МЕТАМОРФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

**Н. С. Уляшева**

*Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия*

Изучены особенности распределения редких и редкоземельных элементов в амфиболитах харбейского метаморфического комплекса Полярного Урала – одного из крупнейших выступов нижнедокембрийского фундамента в пределах Уральской складчатой области. Среди паргасит-гастингситовых амфиболитов, распространенных в центральных частях комплекса, наблюдаются умеренно- и высокотитанистые породы с повышенным содержанием LILE и LREE ( $(La/Yb)_n = 1,33–3,80$ ), схожие по составу с базальтами континентальных рифтов и островных дуг, а также низкотитанистые метавулканисты с низким содержанием LILE и LREE ( $(La/Yb)_n = 0,61–1,32$ ), близкие по геохимическим особенностям к толеитам островных дуг и задуговых бассейнов. Впервые изученные барроизитовые амфиболиты западной части харбейского метаморфического комплекса отличаются по содержанию редких и редкоземельных элементов от паргасит-гастингситовых разновидностей. Для них характерны умеренные концентрации титана и более низкие концентрации LILE и LREE ( $(La/Yb)_n = 0,37–0,53$ ). По составу они схожи с базальтами N-MORB, образовавшимися из деплетированного источника. Различия в химическом составе metabasalts связаны, скорее всего, с эволюцией магматического расплава в результате изменения глубины магмогенерации, степени частичного плавления материнского источника и влияния водного флюида.

**Ключевые слова:** амфиболиты; геохимия; харбейский метаморфический комплекс; Полярный Урал.

### **N. S. Ulyasheva. GEOCHEMISTRY OF AMPHIBOLITES OF THE KHARBEY METAMORPHIC COMPLEX (POLAR URALS)**

The features of the distribution of trace and rare-earth elements were studied in amphibolites of the Kharbey metamorphic complex of the Polar Urals, one of the largest protrusions of the Lower Precambrian basement within the Urals folded region. Among the pargasite-hastingsite amphibolites in the central parts of the complex, there occur moderate and high-titanium rocks with elevated contents of LILE and LREE ( $(La/Yb)_n = 1.33–3.80$ ), similar in composition to basalts of continental rifts and island arcs, as well as low-titanium metavolcanites with low contents of LILE and LREE ( $(La/Yb)_n = 0.61–1.32$ ), which are geochemically similar to tholeiites of arcs and back-arc basins. The barroisitic amphibolites of the western part of the Kharbey metamorphic complex, which were studied for the first time, differ in the content of rare and rare-earth elements from the pargasite-hastingsite varieties. They contain moderate concentrations of titanium, lower amounts of LILE and LREE ( $(La/Yb)_n = 0.37–0.53$ ), and are similar in composition to N-MORB basalts formed from a depleted source. The differences in the geochemical composition

of metabasalts are most likely associated with the evolution of magmatic melt as a result of changes in the depth of magma generation, the degree of partial melting of the mother source, and the influence of aqueous fluid.

**Key words:** amphibolites; geochemistry; Kharbey metamorphic complex; Polar Urals.

---

## **Введение**

Харбейский метаморфический комплекс представляет собой выступ фундамента древней платформы, обрамляющийся верхнепротерозойскими и фанерозойскими толщами Полярного Урала. Комплекс состоит в основном из амфиболитов и гнейсов, уровень метаморфизма которых достигал высокотемпературной амфиболитовой фации умеренных и повышенных давлений [Уляшева, 2011]. Изучение условий формирования субстрата комплекса, основанное в первую очередь на геологических наблюдениях и частично на интерпретации петрогеохимических данных метаморфитов, не дало однозначного решения этой проблемы. Согласно работам разных исследователей, протолиты метаморфитов могли формироваться в трапповой провинции [Душин и др., 1983], в континентальной рифтогенной обстановке [Душин, 1997] или в островодужной системе [Голубева, Афонькин, 2006]. Ранее проведенное нами изучение содержания редких и редкоземельных элементов в паргасит-гастингситовых амфиболитах харбейского метаморфического комплекса показало, что породы могли образоваться в области задугового бассейна [Кузнецова, 2008].

Одним из надежных методов выявления геодинамических обстановок формирования субстрата метаморфических комплексов является изучение геохимических особенностей имеющихся среди них базитов или метабазитов, не претерпевших метасоматические изменения. Несовместимые редкие (литофильные (LILE), высокозарядные (HFSE)) и редкоземельные (REE) элементы ведут себя инертно при изохимическом метаморфизме [Макрыгина, 1981], а содержание их в породах основного состава является хорошим индикатором различных тектонических обстановок [Pearce, 1982; Condie et al., 2002].

В данной работе приводятся результаты изучения геохимических особенностей амфиболитов харбейского метаморфического комплекса, сформировавшихся по базальтам и андезибазальтам, значения содержания редких и редкоземельных элементов в которых получены с помощью ICP-MS метода. Впервые рассматриваются барруазитовые амфиболиты

западной части харбейского комплекса. Эти исследования позволили уточнить геодинамическую обстановку формирования субстрата пород, тем самым расширив представления о тектоническом развитии древних платформ.

## **Геологическая позиция харбейского метаморфического комплекса**

Харбейский метаморфический комплекс находится в южной части одноименного блока в пределах Центрально-Уральского поднятия западной тектонической зоны Полярного Урала. С запада и северо-запада комплекс по надвиговой зоне граничит с верхнепротерозойскими отложениями няровейской серии, а с севера, востока и юга – с палеозойскими породами восточной тектонической зоны (рис. 1).

Согласно схеме IV Уральского межведомственного стратиграфического совещания снизу вверх в харбейском метаморфическом комплексе выделяют ханмейхойскую (амфиболиты, плагиогнейсы и кварциты), лапатюганскую (амфиболиты, гнейсы и мраморы) и париквасьшорскую (гнейсы, кристаллические сланцы и амфиболиты) свиты раннепротерозойского возраста [Стратиграфические..., 1994; Пыстина, Пыстин, 2002]. Переходы между свитами тектонические, иногда постепенные. Возраст комплекса принимается раннепротерозойским согласно имеющимся изотопным датировкам по цирконам из гранат-амфиболового гнейса – 1730 и 2220 млн лет [Краснобаев, 1986], а также по цирконам из гранат-двуслюдяного и гранат-биотитового гнейсов – 1765 и 2071 млн лет [Пыстина, Пыстин, 2002].

Ханмейхойская свита мощностью 1500–2000 м обнажается в бассейнах рек Лонготъеган, Большой и Малый Ханмей, Большой Харбей, а также их притоков (рис. 1) и представлена амфиболитами с прослоями биотитовых, амфиболовых и гранат-двуслюдяных гнейсов. Породы дислоцированы в брахиформные складки, осложненные дизъюнктивными нарушениями [Душин, 1997]. Нами установлено, что ханмейхойская свита в центральной части комплекса в бассейне р. Б. Харбей и ее притоков представлена эденит-паргасит-гастингситовыми и паргасит-гастингситовыми амфиболитами, а в западной части комплекса

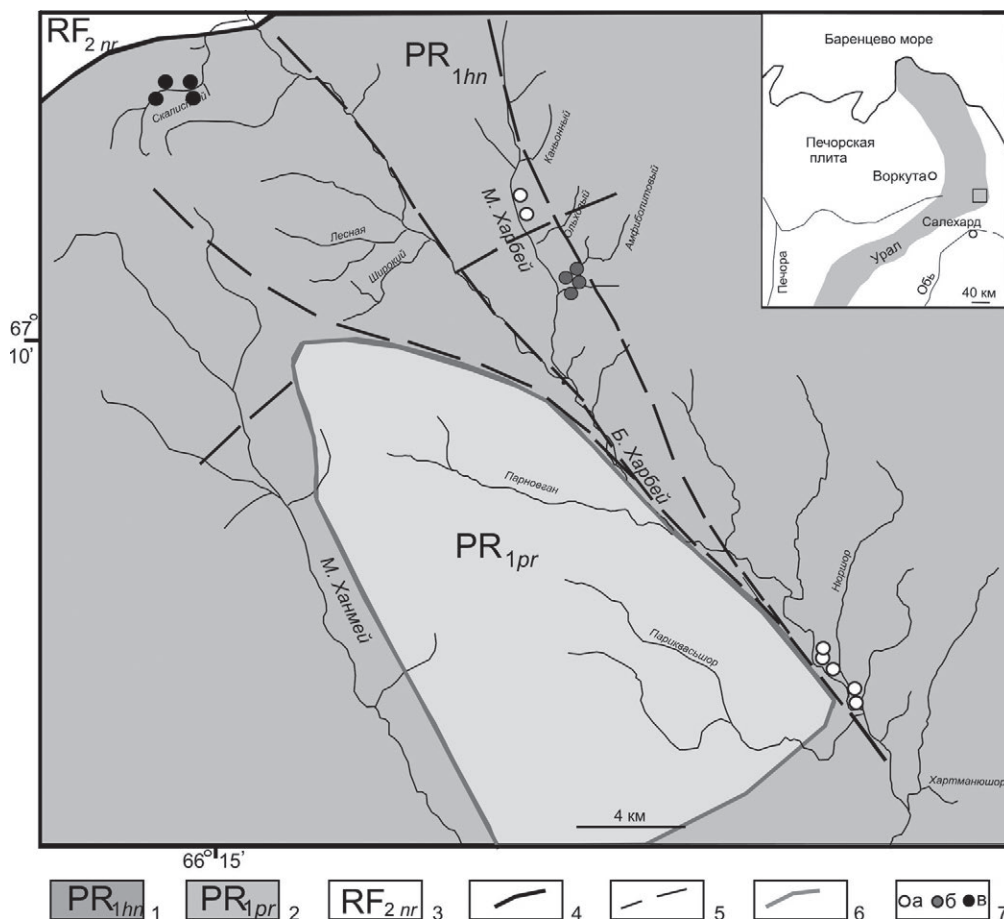


Рис. 1. Схематическая геологическая карта бассейна р. Б. Харбей [по: Охотников, 1975].

Палеопротерозой: 1 – ханмейхойская свита, 2 – париквасьшорская свита. Рифей: 3 – няроевская серия, 4 – граница между харбейским комплексом и няроевской серией, 5 – тектонические нарушения, 6 – граница между ханмейхойской и париквасьшорской свитами, 7 – точки отбора проб: а – обогащенных LREE, б – низкотитанистых паргасит-гастингситовых амфиболитов, в – обедненных LREE барруазитовых амфиболитов

Fig. 1. Schematic geological map of the B. Kharbey river basin (according to [Okhotnikov, 1975]).

Palaeoproterozoic: 1 – Khanmeykhoy suite, 2 – Parikvasshor suite. Riphean: 3 – Nyarovey series, 4 – border between the Kharbey complex and Nyarovey series, 5 – tectonic disturbances, 6 – border between the Khanmeykhoy and Parikvasshor suites, 7 – sampling points: a – LREE-enriched, b – low-titanium pargasite-hastingsite amphibolites; c – LREE-depleted barroisite amphibolites

в бассейне руч. Скалистого – барруазитовыми разновидностями.

### Материалы и методы

Образцы амфиболитов были отобраны в бассейне р. Б. Харбей и по ее притокам (руч. Малый Харбей, Амфиболитовый и Скалистый, рис. 1) в местах, где они не подвержены поздним метасоматическим процессам. Все они принадлежат ханмейхойской свите.

Величины содержания породообразующих оксидов получены с помощью комплексного метода мокрой химии с рентгенофлуоресцент-

ным методом в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Определение концентраций редких и рассеянных элементов в этих породах осуществлялось путем кислотного разложения и дальнейшего анализа с помощью секторного (SF) масс-спектрометра с ионизацией в индуктивно связанной плазме (ICP-MS) в Институте геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого (г. Екатеринбург, масс-спектрометр ELEMENT 2, аналитик Ронкин Ю. Л.), а также в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, ЦКП «Геонаука», масс-спектрометр Agilent 7700x, аналитик Игнатъев Г. В.). Предварительно образцы проходили тщательную

подготовку с контролем качества истирания и квартования для обеспечения соответствующей гомогенности разлагаемого материала.

Химические процедуры, выполненные в ИГ Коми НЦ УрО РАН для подготовки исследуемого материала к масс-спектрометрическому анализу, включали следующие операции. Навеска исходного материала (около 100 мг) помещалась в штатный фторопластовый сосуд микроволновой системы серии MDS (Sineo, КНР), и в зависимости от основного состава пробы добавлялась смесь концентрированных плавиковой, азотной, соляной, хлорной кислот и перекиси водорода (если присутствовала органика). В зависимости от минералогического состава и количества проб устанавливалась соответствующая мощность микроволнового излучения (контроль и регулировка: температуры до 270 °С с точностью 1 °С; давления до 10 МПа ± 0,01/0,1 МПа) и его продолжительность согласно встроенной библиотеке методик разложения. Далее полученные растворы переводились в хлориды путем трехкратного выпаривания соляной кислотой. Затем полученный сухой остаток переводили в 5% раствор азотной кислоты с последующим многократным разбавлением для уменьшения влияния матричных элементов. Перед измерением в пробу добавлялся внутренний стандарт (In) для контроля возможного дрейфа аналитического сигнала в процессе измерения. Все разбавления велись весовым методом для уменьшения неопределенностей измерений. Для минимизации степени загрязнения растворение в смеси кислот, разбавление и непосредственно измерение на приборе выполняли в одноразовых сосудах. В процессе пробоподготовки использовались особо чистые кислоты (ОСЧ), дополнительно очищенные путем глубокой перегонки (sub-boiling), и деионизированная вода. Вместе с анализируемыми образцами выполнялось разложение холостых проб и стандартов. При разложении анализируемые пробы группировались таким образом, чтобы химический состав соответствующего стандарта был максимально близок к составам анализируемых пород. В случае, если такая группировка не представлялась возможным, использовались несколько стандартных образцов. Контроль полноты кислотного разложения осуществлялся контролем прозрачности конечного раствора, отсутствием осадка и выполнением параллельных измерений одной и той же пробы.

Детали мультиэлементного ICP-MS анализа, осуществляемого в ИГГ УрО РАН, описаны в работе [Ронкин и др., 2005]. Результаты анализов двух лабораторий хорошо сопоставимы (табл.).

## Результаты и обсуждение

**Паргасит-гастингситовые амфиболиты**, изученные в бассейне р. Б. Харбей и ее притоков (руч. М. Харбей и Амфиболитовый), образуют пластовые тела, имеют массивную и сланцеватую текстуру, нематогранобластовую структуру (рис. 2, а, б). Кроме амфибола в породах содержатся альбит, иногда олигоклаз, а также в переменном количестве – клиноцоизит, биотит, гранат, мусковит и кварц. Акцессорные минералы представлены цирконом, титанитом и апатитом. Изучение геохимических особенностей этих пород показало, что они отличаются по содержанию редких и редкоземельных элементов.

Амфиболиты, обнажающиеся в бассейнах рек Б. и М. Харбей, имеют умеренное и высокое содержание титана ( $TiO_2$  – 1,07–2,59 %), а также умеренное и повышенное содержание LILE (Ba – 29–687 ppm, Rb – 1,3–37 ppm,  $K_2O$  – 0,22–0,99 %) и LREE (La – 10–17 ppm,  $\Sigma LREE$  – 56–91 ppm) и в дальнейшем будут характеризоваться как обогащенные LREE метабазаальты (рис. 3). Породы образуют слабодифференцированные тренды ( $(La/Yb)_n$  – 2,3–3,8) содержания редкоземельных элементов относительно их содержания в хондрите (рис. 3, а). Спектры распределения REE характеризуются слабо выраженной европиевой аномалией ( $Eu/Eu^*$  – 0,89–1,08). На спайдер-диаграмме (рис. 3, б) спектры распределения редких и редкоземельных элементов также имеют дифференцированный характер с отрицательными аномалиями Nb, Sr, Zr, Hf и Y. На идентификационной диаграмме  $La_{10}/Y_{15}/Nb_8$  точки составов рассматриваемых амфиболитов располагаются в области континентальных базальтов и известково-щелочных вулканитов островных дуг (рис. 4, а). Согласно дискриминантной диаграмме  $Nb_n-Th_n$  (рис. 4, б) метабазаальты обнаруживают признаки обогащенных базальтов континентальной окраины островодужной системы, а также попадают в область пересечения с базальтами задуговых бассейнов (BABV).

Для метабазаальтов, обнажающихся в бассейне руч. Амфиболитового, характерно более низкое содержание LILE (Ba – 14–173 ppm, Rb – 0,6–3,8 ppm,  $K_2O$  – 0,12–0,33 %) и LREE (La – 2,8–4,4 ppm,  $\Sigma LREE$  – 24–33 ppm), чем в предыдущем типе амфиболитов. Породы относятся к низкотитанистым ( $TiO_2$  – 0,84–0,96 %) образованиям известково-щелочной серии. Они имеют пологий недифференцированный спектр (рис. 3, а) распределения REE в 10–20 раз выше хондритовых ( $(La/Yb)_n$  – 0,61–1,32,  $Eu/Eu^*$  – 0,97–1,06). Мультиэлементные спек-

Содержание петрогенных (мас. %), редких и редкоземельных элементов в амфиболитах харьбийского метаморфического комплекса, г/т  
 The content of major (wt %), rare and rare earth elements in the amphibolites of the Kharbey metamorphic complex, ppm

Элемент Element	1*	2	3	4	5	6	7	8*	9	10	11	12	13*	14*	15	16*
SiO <sub>2</sub>	48,66	50,15	44,37	47,28	50,57	51,10	54,22	53,19	52,22	58,69	49,93	53,01	45,66	45,04	52,76	45,32
TiO <sub>2</sub>	1,58	1,37	1,50	1,63	1,15	1,07	2,01	1,50	0,96	0,84	0,87	0,87	1,51	1,49	1,44	1,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,74	14,19	14,71	13,11	13,86	13,26	14,49	12,96	13,71	19,49	18,38	14,89	13,14	14,12	12,77	14,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,36	3,24	6,61	6,79	2,93	3,66	3,46	5,11	1,44	1,13	3,04	2,66	8,19	3,55	3,63	7,33
FeO	7,64	7,48	11,08	10,47	6,48	5,86	7,68	7,52	6,11	3,67	4,42	5,94	7,97	8,65	9,49	7,9
MnO	0,21	0,21	0,53	0,27	0,21	0,18	0,23	0,23	0,23	0,06	0,16	0,20	0,19	0,27	0,29	0,33
MgO	6,35	8,22	6,91	5,58	9,02	7,88	4,18	3,53	10,36	1,39	6,54	7,11	6,16	7,45	6,35	6,78
CaO	9,91	9,62	8,66	10,12	9,49	10,78	7,26	8,40	10,05	4,77	10,07	8,64	11,33	9,21	7,2	7,58
Na <sub>2</sub> O	3,15	2,82	2,38	1,72	3,64	3,27	3,53	4,04	2,48	8,87	4,03	4,64	2,7	2,51	3,36	3,43
K <sub>2</sub> O	0,43	0,61	0,22	0,32	0,99	0,80	0,77	1,52	0,33	0,12	0,28	0,20	0,13	0,12	0,11	0,11
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,37	0,29	0,39	0,47	0,01	0,47	0,32	0,27	0,01	0,03	0,02	0,04	0,14	0,08	0,01	0,09
п. п. п	0,97	1,81	2,66	2,23	1,65	1,66	1,85	1,74	2,09	0,93	2,28	1,81	1,33	1,71	2,6	4,29
Сумма	99,21	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,25	98,53	100	99,36
Rb	1,3	2,7	1,7	1,3	15,7	5,5	14,2	37	2,3	0,6	3,8	1,8	0,7	0,6	0,6	1,2
Ba	71	155	35	29	687	265	514	354	26	14	173	21	5	10	13	8
Th	1,9	2,09	0,59	0,78	0,74	0,71	2,32	2,3	0,14	0,83	0,26	0,17	0,28	0,21	0,26	0,26
K	3569	5064	1826	2656	8218	6641	6392	12618	2739	996	2324	1660	1079	996	913	913
Ta	0,32	0,45	0,36	0,43	0,31	0,35	1,56	0,42	0,08	0,78	0,09	0,13	0,16	0,14	0,19	0,16
Nb	4,6	4,89	3,06	3,99	3,02	3,6	6,21	6,7	0,41	1,58	0,61	1,31	1,6	2	1,44	2,3
Sr	240	213	114	142	187	183	142	260	152	289	227	143	120	96	52	170
Zr	13	11,5	9,2	12	8,4	8,5	35,9	13	5,7	13,5	5,8	6	4,4	2,3	3,5	2,5
Hf	0,64	0,79	0,61	0,68	0,63	0,63	1,59	0,65	0,5	0,68	0,44	0,48	0,37	0,25	0,3	0,34
Ti	9470	8212	8991	9770	6893	6413	12048	8991	5754	5035	5214	5215	9051	8931	8631	7972
La	13	16,7	13,5	13,9	9,7	9,6	12,9	10	2,8	4,4	3,6	3,2	2,8	2	2,4	2,2
Ce	34	39,4	33,5	34,2	23,9	24,9	30,8	30	8,6	12,4	10,6	9,4	9	6,8	6,8	6,8
Pr	4,6	5,1	4,7	4,8	3,4	3,4	4,2	3,8	1,4	1,9	1,7	1,5	1,5	1,2	1,1	1,1
Nd	20	23,3	21,4	21,1	14,4	15,3	20,5	17	7,2	9,9	8,6	8,4	8,2	6,7	6,3	6
Sm	4,6	5,4	5,8	5,8	3,5	3,5	5,6	4,3	2,5	3,3	2,8	2,9	3	2,6	2,4	2,3
Eu	1,5	1,8	2	1,9	1,1	1,2	1,9	1,7	0,9	1,3	1,1	1,1	1	0,9	0,8	0,81
Gd	5,7	5,3	6,4	6,6	3,5	3,8	6,7	5,4	3,2	4,7	3,4	3,8	4,5	3,8	3,7	3,4
Tb	0,73	0,87	1,09	1,14	0,57	0,59	1,03	0,75	0,57	0,86	0,55	0,63	0,76	0,68	0,74	0,59
Dy	4,7	5,4	7,1	7,5	3,5	3,8	6,5	5	3,7	5,8	3,5	4,2	5,9	5,3	5,3	4,6
Ho	0,97	1,1	1,5	1,6	0,72	0,79	1,4	1	0,79	1,3	0,74	0,84	1,3	1,2	1,2	1
Er	2,9	3,2	4,4	4,8	1,9	2,3	4	3,1	2,3	4,1	2	2,3	3,9	3,8	3,4	3,1
Tm	0,4	0,45	0,65	0,69	0,3	0,34	0,56	0,45	0,33	0,69	0,3	0,34	0,56	0,57	0,52	0,45
Yb	2,6	2,9	4	4,6	1,9	2,2	3,7	2,9	2,1	4,9	1,9	2,1	3,6	3,7	3,3	2,8
Lu	0,4	0,45	0,62	0,70	0,29	0,33	0,56	0,45	0,32	0,73	0,28	0,31	0,52	0,58	0,49	0,41

Окончание табл.  
Table (continued)

Элемент Element	1*	2	3	4	5	6	7	8*	9	10	11	12	13*	14*	15	16*
Eu/Eu*	0,89	1	1	0,98	0,96	0,97	0,95	1,08	1,02	0,97	1,04	1,06	0,83	0,88	0,81	0,89
(La/Mb) <sub>n</sub>	3,38	3,8	2,3	2,04	3,33	2,97	2,37	2,33	0,91	0,61	1,32	1	0,53	0,37	0,49	0,53
ΣLREE	77,7	91	80	81,7	56,01	57,8	75,9	66,8	23,6	33,2	28,4	26,5	25,5	20,2	19,8	19,2
La/Mb	5	5,7	3,4	3,02	4,9	4,4	3,5	3,4	1,3	0,9	1,9	1,48	0,8	0,5	0,7	0,8
Th/Ta	5,9	4,7	1,6	1,8	2,4	2,01	1,5	5,5	1,8	1,1	2,8	1,3	1,8	1,5	1,4	1,6
Gd/Mb	2,19	1,82	1,59	1,43	1,77	1,73	1,84	1,86	1,52	0,97	1,82	1,77	1,25	1,03	1,13	1,21
La/Lu	32,5	37,3	21,8	19,8	32,6	29,1	23,1	22,2	9,02	6,04	13,1	10,2	5,4	3,45	4,86	5,4
(Gd/Yb) <sub>n</sub>	1,78	1,5	1,3	1,16	1,43	1,41	1,49	1,51	1,23	0,79	1,47	1,43	1,01	0,83	0,91	0,98
Th/Nb	0,41	0,42	0,19	0,19	0,25	0,19	0,37	0,34	0,32	0,52	0,44	0,13	0,2	0,11	0,18	0,11

Примечание. 1–8 – паргасит-гастингситовые амфиболиты, распространенные в среднем течении реки Б. Харбей и по руч. М. Харбей; 9–12 – паргасит-гастингситовые амфиболиты, распространенные по руч. Амфиболитовому; 13–16 – барруазитовые амфиболиты руч. Скалистого. Анализы с номерами со звездочкой выполнены ICP-MS методом в Институте геологии КНЦ УрО РАН (Сыктывкар), без звездочки – ICP-MS методом в Институте геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого (Екатеринбург).

Note. 1–8 – pargasite-hastingsite amphibolites distributed in the middle reaches of the B. Kharbey River and along stream M. Kharbey; 9–12 – pargasite-hastingsite amphibolites, distributed by stream Amfibolitovoy; 13–16 – barroisite amphibolites stream Skalistyi. Analyses with numbers with an asterisk were performed by the ICP-MS method at the Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Syktyvkar), without an asterisk, the ICP-MS method was performed at the Institute of Geology and Geochemistry named after A. N. Zavaritsky (Ekaterinburg).

тры (рис. 3, б) характеризуются сильными минимумами по концентрациям Th, Ta, Hf и Zr. Содержание этих элементов ниже, чем в обогащенных LREE амфиболитах. На диаграмме La/10–Y/15–Nb/8 точки составов низкотитанистых амфиболитов располагаются в области низкокалиевых толеитов островных дуг (рис. 4, а), а на диаграмме Nb<sub>n</sub>–Th<sub>n</sub> они попадают в область пересечения островодужных образований и вулканитов BABB (рис. 4, б).

Результаты анализа содержания малых элементов в паргасит-гастингситовых амфиболитах центральной части харбейского комплекса, полученные с помощью ICP-MS метода, не расходятся с ранее выдвинутым предположением о формировании их протолита в задуговом бассейне [Кузнецова, 2008], где распространены породы с различными геохимическими метками.

**Барруазитовые амфиболиты** наблюдаются в западной части харбейского метаморфического комплекса в бассейне руч. Скалистого. Они образуют толщи мощностью до 10 м и более, имеют слабосланцеватую текстуру, гранонематобластовую структуру и состоят из амфибола (барруазита), граната, клиноцоизита, альбита и хлорита (рис. 2, в, г). Акцессорные минералы представлены цирконом и титанитом. Породы характеризуются низкими концентрациями LILE (Ba – 5–13 ppm, Rb – 0,6–1,2 ppm, K<sub>2</sub>O – 0,10–0,22 %) и LREE (La – 2–2,8 ppm, ΣLREE – 19–26 ppm) относительно амфиболитов центральных частей харбейского комплекса и являются среднетитанистыми (TiO<sub>2</sub> – 1,33–1,51 %) толеитами. Кроме того, они образуют характерный для примитивных базальтов N-MORB тренд содержания редкоземельных элементов с обеднением LREE ((La/Yb)<sub>n</sub> – 0,37–0,53) и в дальнейшем будут приводиться как обедненные LREE амфиболиты (рис. 3, а). На спайдер-диаграмме, где содержание редких и редкоземельных элементов нормировано на состав базальта N-MORB, наблюдается пологий недифференцированный спектр распределения элементов барруазитовых амфиболитов, лишь с четкими минимумами по Zr (2,3–4,4 ppm) и Hf (0,25–0,37 ppm), содержание которых ниже, чем в амфиболитах центральной частей харбейского метаморфического комплекса (рис. 3, б). На идентификационных диаграммах La/10–Y/15–Nb/8 и Nb<sub>n</sub>–Th<sub>n</sub> точки составов барруазитовых амфиболитов располагаются в области базальтов N-MORB или в поле пересечения N-MORB и BABB, и это указывает, что они сформировались по примитивным базальтам (рис. 4).

Таким образом, барруазитовые амфиболиты отличаются по геохимическим особенно-

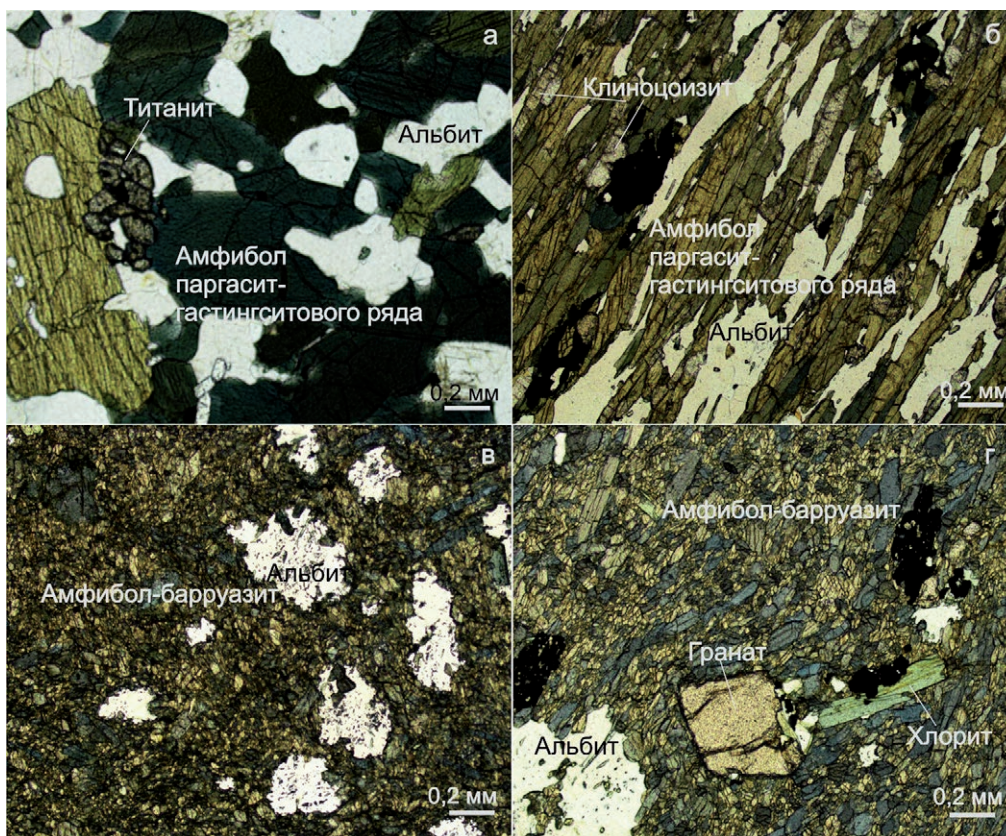


Рис. 2. Фотографии шлифов (без анализатора) паргасит-гастингситовых массивных (а) и сланцеватых (б) амфиболитов центральной части харбейского метаморфического комплекса и барруазитовых амфиболитов (в, г) руч. Скалистого

Fig. 2. Photographs of thin sections (without the analyzer) of pargasite-hastingsite massive (a) and schisty (b) amphibolites of the central part of the Kharbey metamorphic complex and barroisite amphibolites (c, d) of stream Skalistyi

стям и условиям формирования от паргасит-гастингситовых метавулканитов.

### Состав и глубина магматического источника

Характерные для всех пород отрицательные аномалии Zr и Hf, одних из наиболее стабильных элементов, отражающих состав мантийного источника [Hellman, Green, 1979], могут свидетельствовать о генетическом родстве между metabasalts. Различия амфиболитов по содержанию редких и редкоземельных элементов, скорее всего, связаны с составом и глубиной источников материнского расплава.

Протолиты паргасит-гастингситовых амфиболитов с повышенными концентрациями LREE сформировались, скорее всего, из обогащенного мантийного источника с малой долей частичного плавления субстрата, так как имеют повышенные значения отношений Gd/Yb (1,43–2,19), La/Lu (19,8–37,3), Th/Ta (1,5–5,9), La/Yb (3,02–5,7) (рис. 5). Невысокие значения

отношений  $(Gd/Yb)_n$ , равные 1,3–1,8, свидетельствуют об отсутствии в источнике реститового граната, а плавящая порода, видимо, находилась на уровне фации шпинелевого лерцолита. Материнская порода, из которой выплавлялись расплавы низкотитанистых паргасит-гастингситовых амфиболитов, согласно индикаторным отношениям  $(Gd/Yb - 0,97-1,81; La/Lu - 6,04-13,1; Th/Ta - 1,1-2,8; La/Yb - 0,9-1,95; (Gd/Yb)_n - 0,79-1,47)$ , близка по составу к примитивной мантии и характеризуется большей долей частичного плавления мантийного вещества. Учитывая отрицательные аномалии по Nb и Ta, а также повышенные значения Th/Nb отношения, равные 0,2–0,53, для этих двух типов metabasalts можно предположить присутствие некоторой доли субдукционного компонента или водного флюида в их источниках [Hellman, 1979; Pearce, 1982; Saunders et al., 1988]. Выплавки для протолитов барруазитовых обедненных LREE амфиболитов образовались на меньшей глубине из деплетированного источника с наибольшей долей частичного

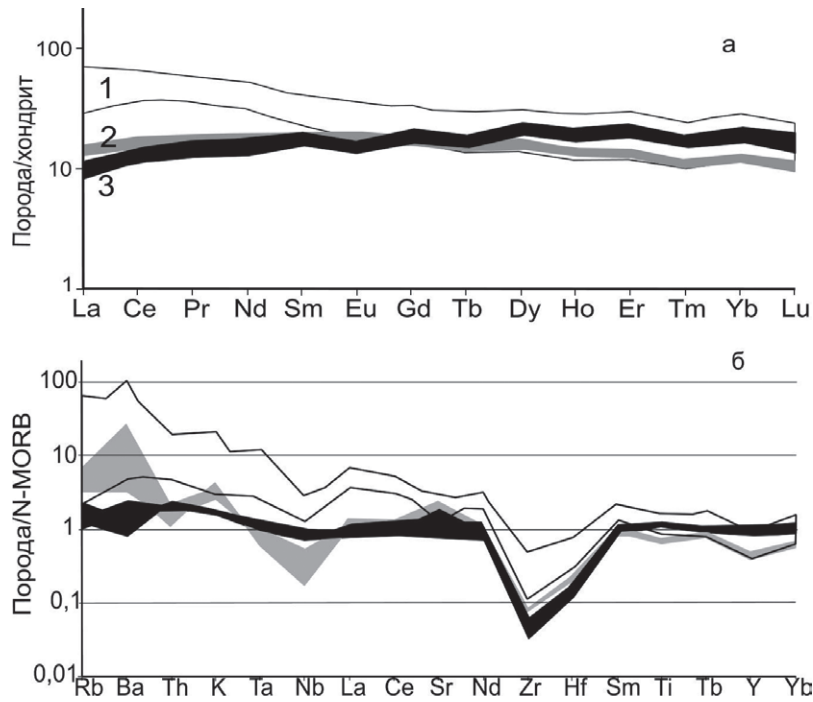


Рис. 3. Содержание REE и редких элементов в амфиболитах харьбейского метаморфического комплекса, нормированное относительно их содержания в хондрите (а) и базальте N-MORB (б) [Sun, McDonough, 1989].

Поля: 1 – обогащенных LREE амфиболитов, 2 – низкотитанистых амфиболитов, 3 – обедненных LREE амфиболитов

Fig. 3. The contents of REE and rare elements in the amphibolites of the Kharbey metamorphic complex, normalized with respect to their contents in chondrite (a) and basalt N-MORB (b) [Sun, McDonough, 1989].

Fields: 1 – LREE-enriched amphibolites, 2 – low-titanium amphibolites, 3 – LREE-depleted amphibolites

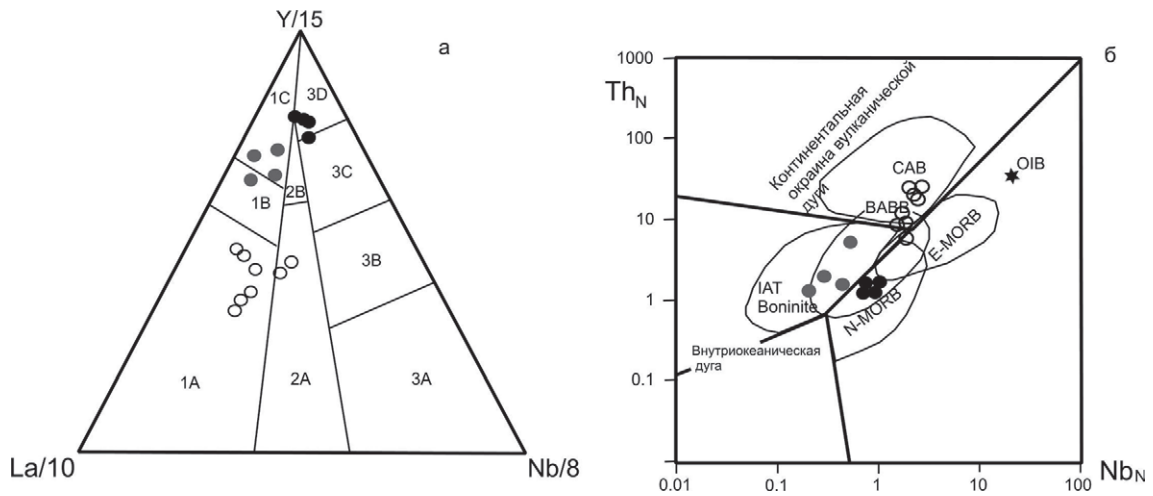


Рис. 4. Положение точек состава амфиболитов харьбейского метаморфического комплекса на диаграммах La/10–Y/15–Nb/8 (а) [Cabanis, Lecolle, 1989] и Nb<sub>n</sub>–Th<sub>n</sub> (б) [Saccani, 2014]. Nb и Th нормализованы к составу N-MORB [Sun, McDonough, 1989].

Названия полей на диаграммах соответствуют: 1А – CAB (известково-щелочные базальты), 1В – CAB+IAT (островодужные толеиты), 1С – IAT, 2А – континентальные базальты, 2В – BABB (базальты задугового бассейна), 3А – щелочные базальты континентальных рифтов, 3В, 3С – E-MORB (обогащенные базальты срединно-океанических хребтов), 3D – N-MORB (примитивные базальты срединно-океанических хребтов). Здесь и на рис. 5: условные обозначения для точек составов – см. рис. 1

Fig. 4. The location of the composition points of amphibolites of the Kharbey metamorphic complex in the La/10–Y/15–Nb/8 diagrams (a) [Cabanis, Lecolle, 1989] and Nb<sub>n</sub>–Th<sub>n</sub> (b) [Saccani, 2014]. Nb and Th are normalized to the N-MORB composition [Sun, McDonough, 1989].

Field names: 1A – CAB (calc-alkaline basalts), 1B – CAB+IAT (island-arc tholeiites), 1C – IAT, 2A – continental basalts, 2B – BABB (basalts of the back-arc basin), 3A – alkaline basalts of continental rifts, 3B, 3C – E-MORB (enriched basalts of the mid-ocean ridges), 3D – N-MORB (primitive basalts of the mid-ocean ridges). Here and in Fig. 5: see Fig. 1 for the composition points legend



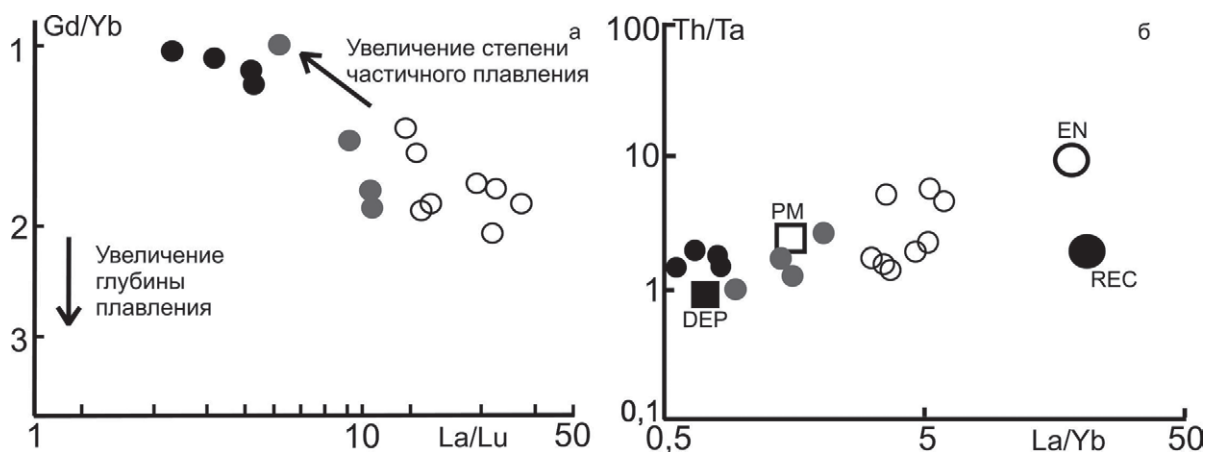


Рис. 5. Точки составов амфиболитов харьбейского метаморфического комплекса на диаграммах La/Lu–Gd/Yb [Boyce et al., 2015] и La/Yb–Th/Ta [Condie et al., 2002]:

PM – примитивная мантия, DEP – деплетированная мантия, EN – обогащенный компонент, REG – рециклированный компонент

Fig. 5. Composition points of amphibolites of the Kharbey metamorphic complex in the La/Lu–Gd/Yb diagrams [Boyce et al., 2015] and La/Yb–Th/Ta diagrams [Condie et al., 2002].

PM – primitive mantle, DEP – depleted mantle, EN – enriched component, REG – recycled component

плавления субстрата по сравнению с предыдущими типами metabазальтов, о чем свидетельствуют низкие значения отношений Gd/Yb (1,03–1,25), La/Lu (3,45–5,4), Th/Ta (1,4–1,8), La/Yb (0,5–0,8),  $(Gd/Yb)_n$  (0,83–1,01). Эти породы сформировались, по-видимому, без участия субдукционного компонента, так как для них характерны пониженные значения Th/Nb (0,11–0,18) и отсутствует аномалия по Nb.

Если рассматривать протолиты барруазитовых амфиболитов в рамках образования в островодужной системе, то они могли являться производными завершающего этапа формирования океанической коры задугового пространства уже после прекращения процессов субдукции. Аномально низкие количества циркония и гафния, характерные для всех типов амфиболитов, скорее всего, связаны с составом плавящегося субстрата, который, возможно, претерпел метасоматические изменения. На увеличение этой аномалии от обогащенных амфиболитов до примитивных образований также могло повлиять повышение степени плавления мантийного вещества.

## Заключение

Изучение содержания редких и редкоземельных элементов в амфиболитах харьбейского метаморфического комплекса показало, что в пределах ханмейхойской свиты встречаются породы с разными геохимическими метками.

Среди паргасит-гастингситовых амфиболитов центральной части комплекса встре-

чаются умеренно- и высокотитанистые породы с повышенным содержанием LILE и LREE ( $(La/Yb)_n$  – 2,3–3,8), схожие по составу с базальтами континентальных рифтов и островных дуг, а также низкотитанистые метавулканы с низкими концентрациями LILE и LREE ( $(La/Yb)_n$  – 0,61–1,32), близкие по геохимическим особенностям к толеитам островных дуг и задуговых бассейнов. Для этих пород характерны отрицательные аномалии по содержанию Nb и Ta.

В западной части комплекса распространены барруазитовые амфиболиты, отличающиеся от паргасит-гастингситовых амфиболитов центральных частей комплекса более низким содержанием LILE и LREE ( $(La/Yb)_n$  – 0,37–0,53). Они схожи по составу с примитивными базальтами N-MORB, сформировавшимися из деплетированного источника.

Все изученные амфиболиты, несмотря на различия в содержании редких и редкоземельных элементов, скорее всего, генетически связаны, на что указывают характерные для всех типов пород отрицательные аномалии по Hf и Zr. Различия в геохимическом составе metabазальтов связаны, скорее всего, с эволюцией магматического расплава в результате изменения глубины магмогенерации, степени частичного плавления материнского источника и влияния водного флюида. Если рассматривать изученные амфиболиты в концепции их развития в островодужной системе, то протолиты паргасит-гастингситовых амфиболитов могли формироваться на более ранних и средних этапах развития задугового пространства,

а барруазитовые метабазалты – на завершающей стадии развития задугового бассейна уже после прекращения процессов субдукции.

Автор благодарит д. г.-м. н., профессора А. М. Пыстина, а также Ю. Л. Ронкина и Г. В. Игнатъева за помощь и консультацию.

## Литература

Голубева И. И., Афонькин М. М. Амфиболиты париквасьшорской свиты как индикатор наличия докембрийской островной дуги на Полярном Урале // Петрология и минералогия севера Урала и Тимана: Сб. ст. (Тр. Института геологии. Вып. 119). № 4. Сыктывкар, 2006. С. 22–38.

Душин В. А., Макаров А. Б., Сычева Э. А., Исхаков Р. А. О формационной принадлежности метаморфитов харьбейского гнейсо-амфиболитового комплекса // Геология метаморфических комплексов. Межвуз. темат. сб. Свердловск: СГИ, 1983. С. 83–90.

Душин В. А. Магматизм и геодинамика палеоконтинентального сектора севера Урала. М.: Недра, 1997. 213 с.

Краснобаев А. А. Циркон как индикатор геологических процессов. М.: Наука, 1986. 152 с.

Кузнецова Н. С. Состав и условия формирования мафитов харьбейского комплекса (Полярный Урал) // Литосфера. 2008. № 1. С. 51–65.

Макрыгина В. А. Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма умеренных и низких давлений. Новосибирск: Наука, 1981. 200 с.

Охотников В. Н. Геология рудных образований Полярного Урала. Л.: Наука, 1975. 175 с.

Пыстина Ю. И., Пыстин А. М. Цирконовая летопись уральского докембрия. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 168 с.

Ронкин Ю. Л., Лепихина О. П., Голик С. В., Журавлев Д. З., Попова О. Ю. Мультиэлементный анализ геологических образцов кислотным разложением и окончанием на HR ICP-MS Element2 // Ежегодник-2004: Информ. сб. науч. тр. ИГГ УрО РАН. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. С. 423–433.

Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). Екатеринбург, 1994.

Уляшева Н. С. Термодинамическая эволюция метаморфизма метабазитов харьбейского комплекса // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2011. № 9. С. 2–6.

Boyce J. A., Nicholls I. A., Keays R. R., Hayman P. C. Variation in parental magmas of Mt Rouse, a complex polymagmatic monogenetic volcano in the basaltic intraplate Newer Volcanics Province, southeast Australia // Contrib. Mineral. Petrol. 2015. Vol. 169, 11. doi: 10.1007/s00410-015-1106-y

Cabanis B., Lecolle M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale // Comptes Rendus de l'Academie des Sciences. 1989. Vol. 309. P. 2023–2029.

Condie K. C., Frey B. A., Kerrich R. The 1.75 – Ga Iron King Volcanics in west-central Arizona: a remnant of an accreted oceanic plateau derived from a mantle plume with a deep depleted component // Lithos. 2002. Vol. 64. P. 49–62. doi: 10.1016/S0024-4937(02)00158-5

Hellman P. L., Green T. H. The high pressure experimental crystallization of staurolite in hydrous mafic compositions // Contribut. Mineral. Petrol. 1979. Vol. 68. P. 369–377.

Pearce J. A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries // Andesite / Ed. R. S. Thorpe. London, 1982. P. 526–547.

Saccani E. A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th-Nb and Ce-Dy-Yb systematic // Geosci. Front. 2014. Vol. 6, iss. 4. doi: 10.1016/j.gsf.2014.03.006

Saunders A. D., Norry M. J., Tarney J. Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: trace element constraints // J. Petrol (Special Lithosphere Iss.). 1988. P. 415–445.

Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the oceanic basins / Eds. A. D. Saunders, M. J. Norry. Geol. Soc. Spec. Publ. 1989. No. 42. P. 313–345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

Поступила в редакцию 04.06.2020

## References

Dushin V. A., Makarov A. B., Sycheva E. A., Iskhakov R. A. O formatsionnoi prinadlezhnosti metamorfитov kharbeiskogo gneiso-amfibolitovogo kompleksa [On the formation of metamorphites of the Kharbey gneiss-amphibolite complex]. *Geol. metamorficheskikh kompleksov. Mezhevuz. temat. sb.* [Geol. of metamorphic complexes. Interuniv. subj. coll.]. Sverdlovsk: SGI, 1983. P. 83–90.

Dushin V. A. Magmatizm i geodinamika paleokontinental'nogo sektora severa Urala [Magmatism and geodynamics of the paleocontinental sector of the north of the Urals]. Moscow: Nedra, 1997. 213 p.

Golubeva I. I., Afon'kin M. M. Amfibolity parikvas'shorskoi svity kak indikator nalichiya dokembriiskoi ostrovnnoi

dugi na Polyarnom Urale [Amphibolites of the Parvikashor formation as an indicator of the Precambrian island arc in the Polar Urals]. *Petrol. i mineralogiya severa Urala i Timana (Trudy Instituta geol. Vyp. 119)* [Petrology and Mineralogy of the North of the Urals and Timan (Proceed. Inst. Geol. Iss. 119)]. Syktyvkar, 2006. No. 4. P. 22–38.

Krasnobaev A. A. Tsirkon kak indikator geologicheskikh protsessov [Zircon as an indicator of geological processes]. Moscow: Nauka, 1986. 152 p.

Kuznetsova N. S. Sostav i usloviya formirovaniya mafitov kharbeiskogo kompleksa (Polyarnyi Ural) [Composition and conditions for the formation of mafites of the Kharbey complex (Polar Urals)]. *Litosfera* [Lithosphere]. 2008. No. 1. P. 51–65.

*Makrygina V. A.* Geokhimiya regional'nogo metamorfizma i ul'trametamorfizma umerennykh i nizkikh davlenii [Geochemistry of regional metamorphism and ultrametamorphism of moderate and low pressures]. Novosibirsk: Nauka, 1981. 200 p.

*Okhotnikov V. N.* Geologiya rudnykh obrazovaniy Pol'yarnogo Urala [Geology of ore formations of the Polar Urals]. Leningrad: Nauka, 1975. 175 p.

*Pystina Yu. I., Pystin A. M.* Tsirkonovaya letopis' ural'skogo dokembriya [Zircon chronicle of the Ural Precambrian]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2002. 168 p.

*Ronkin Yu. L., Lepihina O. P., Golik S. V., Zhuravlev D. Z., Popova O. Yu.* Mul'tielementnyi analiz geologicheskikh obraztsov kislotnym razlozheniem i okonchaniem na HR ICP-MS Element2 [Multi-element analysis of geological samples by acid decomposition and completion on HR ICP-MS Element2]. *Ezhegodnik-2004: Inform. sb. nauch. tr. IGG UrO RAN* [Proceed. IGG UB RAS. Yearbook-2004]. Ekaterinburg: IGG UB RAS, 2005. P. 423–433.

*Stratigraficheskie skhemy Urala (dokembrii, paleozoii)* [Stratigraphic schemes of the Urals (Precambrian, Paleozoic)]. Ekaterinburg, 1994.

*Ulyasheva N. S.* Termodinamicheskaya evolyutsiya metamorfizma metabazitov kharbeiskogo kompleksa [Thermodynamic evolution of metamorphism of metabasites of the Kharbey complex]. *Vestnik IG Komi NTs UrO RAN* [Bull. IG Komi Sci. Center, Ural Br. RAS]. 2011. No. 9. P. 2–6.

*Boyce J. A., Nicholls I. A., Keays R. R., Hayman P. C.* Variation in parental magmas of Mt Rouse, a complex polymagmatic monogenetic volcano in the basaltic intraplate Newer Volcanics Province, southeast Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.* 2015. Vol. 169, 11. doi: 10.1007/s00410-015-1106-y

*Cabanis B., Lecomte M.* Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences* [Proceed. Acad. Sci.]. 1989. Vol. 309. P. 2023–2029.

*Condie K. C., Frey B. A., Kerrich R.* The 1.75 – Ga Iron King Volcanics in west-central Arizona: a remnant of an accreted oceanic plateau derived from a mantle plume with a deep depleted component. *Lithos.* 2002. Vol. 64. P. 49–62. doi: 10.1016/S0024-4937(02)00158-5

*Hellman P. L., Green T. H.* The high pressure experimental crystallization of staurolite in hydrous mafic compositions. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1979. Vol. 68. P. 369–377.

*Pearce J. A.* Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. *Andesite*. Ed. R. S. Thorpe. London, 1982. P. 526–547.

*Saccani E.* A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th-Nb and Ce-Dy-Yb systematic. *Geosci. Front.* 2014. Vol. 6, iss. 4. doi: 10.1016/j.gsf.2014.03.006

*Saunders A. D., Norry M. J., Tarney J.* Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: trace element constraints. *J. Petrol (Special Lithosphere Iss.)*. 1988. P. 415–445.

*Sun S. S., McDonough W. F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the oceanic basins*. Eds. A. D. Saunders, M. J. Norry. Geol. Soc. Spec. Publ. 1989. No. 42. P. 313–345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

Received June 04, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

### Уляшева Наталия Сергеевна

научный сотрудник лаб. региональной геологии  
Институт геологии им. Н. П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Коми научный центр РАН»  
ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, Республика Коми,  
Россия, 167982  
эл. почта: nataliaulyashewa@yandex.ru

## CONTRIBUTOR:

### Ulyasheva, Natalia

Institute of Geology, Komi Science Centre,  
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences  
54 Pervomaiskaya St., 167982 Syktyvkar, Komi, Russia  
e-mail: nataliaulyashewa@yandex.ru

УДК 553.21/24:553.54

## ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДА И КИСЛОРОДА КАРБОНАТОВ ИЗ МЕТАКОМАТИИТОВ КОСТОМУКШСКОЙ ЗЕЛЕНОКАМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

**Е. Е. Климовская**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

Изучены соотношения стабильных изотопов углерода и кислорода жильных карбонатов из гидротермально-метасоматически преобразованных мезоархейских метакوماتиитов Костомукшской зеленокаменной структуры, установлены изотопный состав, вероятные источники и предложены основные гипотезы происхождения флюида, под воздействием которого образовались залежи талькового камня на месторождении Озерки и проявлении Пентинсуо. Минералообразующий флюид характеризовался узкими диапазонами значений изотопного состава углерода  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  от  $-0,6$  до  $+1,1$  ‰ и кислорода  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  от  $+5,6$  до  $+9,1$  ‰. Полученные изотопные данные свидетельствуют, что флюид образовался в результате процессов дегидратации, декарбонатизации и растворения карбонатов при прогрессивном метаморфизме гидротермально измененных (метаморфизм морского дна) зеленокаменных пород в глубоких уровнях коматиит-базальтовой толщи Костомукшской структуры и/или в результате изотопного обмена магматического флюида позднеорогенных гранитных интрузий с породами коматиит-базальтовой ассоциации.

Ключевые слова: стабильные изотопы; карбонатизация; коматиит; Костомукшская; тальк; карбонат.

### **E. E. Klimovskaya. CARBON AND OXYGEN ISOTOPE COMPOSITION OF CARBONATES IN METAKOMATIITES OF THE KOSTOMUKSHA GREENSTONE STRUCTURE**

Carbon and oxygen stable isotope ratios in vein carbonates from hydrothermally-metasomatically altered Mesoarchaeon metakomatiites of the Kostomuksha greenstone structure were studied, the isotopic composition, probable sources, and the main hypotheses on the origin of the fluid that influenced the formation of soapstone in Ozerki deposit and Pentinsuo occurrence were established. The mineral forming fluid featured narrow ranges of carbon isotopic composition  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  (from  $-0.6$  to  $+1.1$  ‰) and oxygen isotopic composition  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  (from  $+5.6$  to  $+9.1$  ‰). The obtained isotopic data indicate that the fluid was generated by the processes of dehydration, decarbonation and dissolution of carbonates during progressive metamorphism of hydrothermally altered (sea-floor metamorphism) greenstone rocks at deep levels of the komatiite-basalt sequence of the Kostomuksha structure and/or as a result of isotopic exchange of late orogenic granite intrusions' primary magmatic fluid with rocks of the komatiite-basalt association.

Keywords: stable isotopes; carbonatization; komatiite; Kostomuksha; talc; carbonate.

## Введение

Исследования коматиитов в зеленокаменных поясах древнейших кратонов показали, что все они в различной степени изменены в результате вторичных процессов [Конди, 1983; Arndt et al., 2008]. Одним из широко проявленных процессов в архейских вулканических толщах является карбонатизация коматиитов под воздействием  $H_2O-CO_2$  флюидов, в результате которой по мере увеличения концентрации  $CO_2$  происходит последовательное замещение серпентинизированных ультрамафитов (тремолит) серпентин-карбонатными, тальк-карбонатными и кварц-карбонатными породами. С кварц-карбонатными породами пространственно ассоциируют месторождения и рудопроявления Au, Hg, As, Sb, Co, Ni. К областям развития тальк-карбонатных пород приурочены месторождения железистых тальковых руд, магнезита, талькового камня.

Проблема источников  $H_2O-CO_2$  флюидов в архейских зеленокаменных поясах широко освещена в литературе в связи с вопросом установления природы рудообразующих флюидов на орогенных месторождениях золота. Многочисленные изотопные исследования демонстрируют успешное использование соотношений стабильных изотопов в породообразующих и жильных карбонатах для оценки вклада различных источников углерода и воды в гидротермальном флюиде [Fyon et al., 1982, 1983; Groves et al., 1988; Golding et al., 1989; Kerrich, 1989 и др.].

На территории Карельского кратона исследования изотопного состава карбонатов в гидротермально-метасоматически измененных породах архейских вулканоогенно-осадочных ассоциаций проведены преимущественно для финских золоторудных месторождений и проявлений. Несмотря на высокую степень изученности средне- и низкотемпературных метасоматитов российской части кратона, недостаточное внимание уделено изучению соотношений стабильных изотопов в минералах метасоматитов.

В данной работе представлены первые результаты изучения стабильных изотопов углерода и кислорода в карбонатах метакоматиитов Костомукшской зеленокаменной структуры Карельского кратона Фенноскандинавского щита с целью выяснения вероятных источников минералообразующих флюидов, ответственных за формирование талькового камня на месторождении Озерки и проявлении Пентинсуо. Установление возможных источников флюидов имеет важное значение для разработки

геолого-генетической модели формирования месторождения и расшифровки взаимосвязи процессов карбонатизации с тектоно-магматическими этапами геологической эволюции Костомукшской зеленокаменной структуры.

## Геологическая характеристика и эволюция эндогенных процессов Костомукшской зеленокаменной структуры

Костомукшская зеленокаменная структура расположена в западной части Костомукшско-Гимольского зеленокаменного пояса Карельского кратона и представляет собой асимметричную синформу (рис. 1). В стратиграфическом разрезе структуры выделяются нижняя терригенная *нюкозерская*, средняя существенно вулканогенная *контокская* и верхняя осадочная *гимольская* серии [Горьковец и др., 1981, 1991; Стратиграфия..., 1992].

Нюкозерская толща включает биотитовые, гранат-биотитовые, мусковитовые, двуслюдяные гнейсы по метапесчаникам и аркозам, реже прослой полевошпатовых кварцитов и мигматиты.

Вулканогенная часть разреза слагает западный борт структуры и представлена метакоматиитами, метабазальтами (~2,84–2,80 млрд лет), с прослоями углеродсодержащих сланцев, кварцитов и кислых туфов (ниемиярвинская и рувинваарская свиты), а также кислыми вулканитами (~2,79–2,80 млрд лет), туфами, туффитами, магнетитовыми сланцами и кварцитами, углеродсодержащими сланцами (шурловаарская свита). Петрологические и изотопно-геохимические данные свидетельствуют, что накопление вулканитов коматиит-базальтовой ассоциации происходило в обстановке океанического плато [Puchtel et al., 1998].

Гимольская серия слагает восточный борт структуры и представлена полимиктовыми конгломератами, гравелитами, граувакками с прослоями углеродсодержащих сланцев, ритмично-слоистыми биотитовыми сланцами и горизонтами хемогенных железистых кварцитов, формирующими Костомукшское и Корпангское железорудные месторождения. Верхняя граница пород гимольской серии определяется возрастом (~2,7 млрд лет) прорывающих их плагиогранитпорфиров (геллифлинты).

В обрамлении структуры развиты гранитоиды ТТГ-серии, которые рассматриваются исследователями как фундамент супракрустальных толщ [Горьковец и др., 1981; Лобач-Жученко и др., 2000] либо как синтетектонические интрузии, по времени (~2,78 млрд лет) сопряженные с формированием супракрустальных

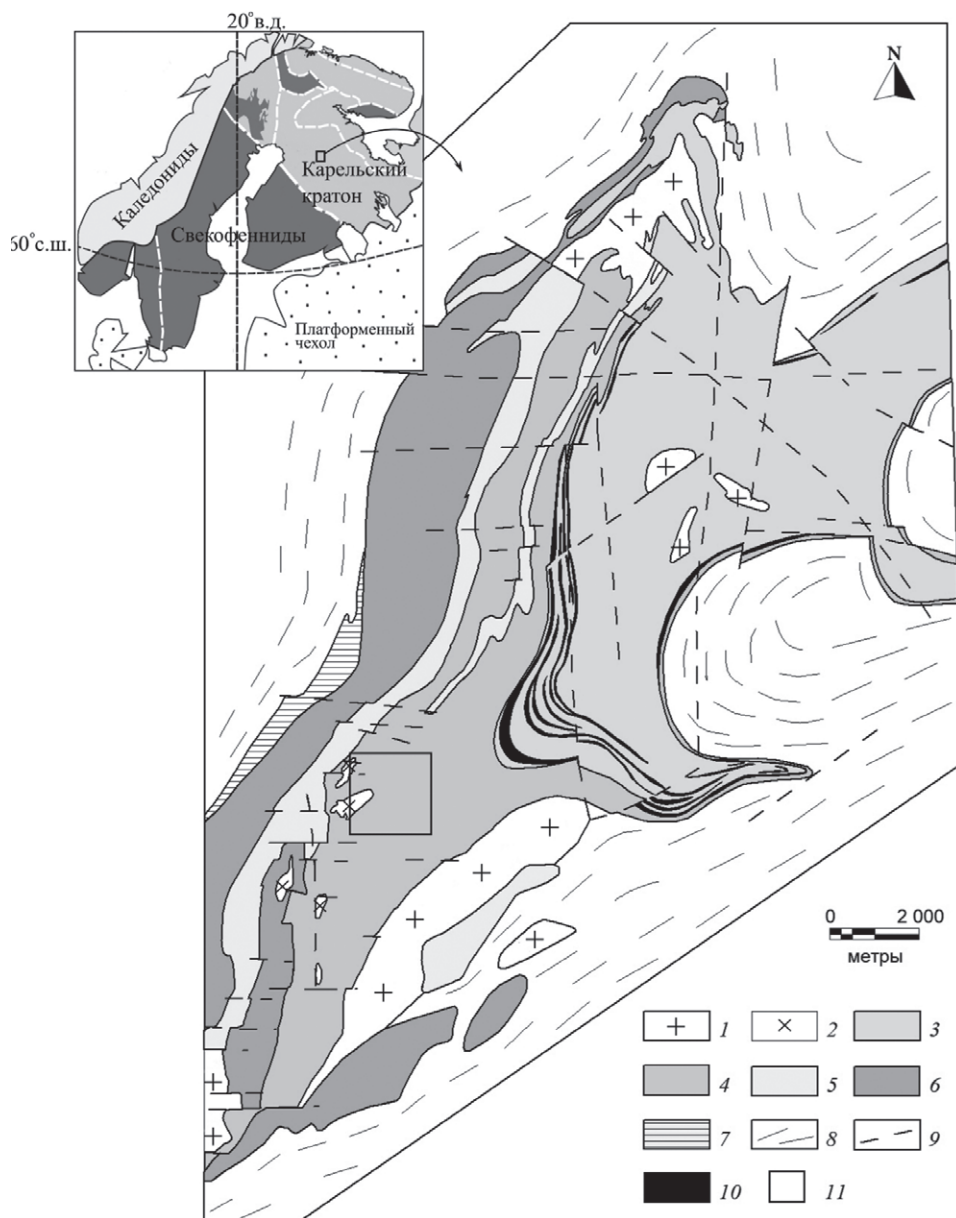


Рис. 1. Схема геологического строения Костомукшской зеленокаменной структуры [по: Кулешевич, 2004 с упрощением]:

1 – Na-K граниты (2,7–2,68 млрд лет), 2 – диориты – гранит-порфиры (2,72 млрд лет), 3 – сланцы гимольской серии. Контокская серия: 4 – metabasalts and metakomatiites, Ruvinvaara suite; 5 – кислые метавулканыты, магнетитовые сланцы и кварциты шурловаарской свиты; 6 – metabasalts, Niemijärvi suite. 7 – гнейсы нюкозерской серии, 8 – гранито-гнейсы и мигматиты, 9 – тектонические нарушения, 10 – железные руды, 11 – местоположение объектов исследования

Fig. 1. Schematic geological map of the Kostomuksha greenstone structure [simplified after Kuleshevich, 2004]:

1 – Na-K granite (2,7–2,68 Ga), 2 – diorite – granite-porphry (2,72 Ga), 3 – schist, Gimoly series. Kon-tokki series: 4 – metabasalts and metakomatiites, Ruvinvaara suite; 5 – felsic metavolcanics, magnetite schists and quartzite, Shurlovaara suite; 6 – metabasalts, Niemijärvi suite. 7 – gneisses, Nyukkoze-ro series; 8 – granite-gneiss and migmatite; 9 – faults; 10 – iron ores; 11 – location of study areas

образований [Самсонов и др., 2001, 2004]. По геохимическим характеристикам ТТГ-гранитоиды западного обрамления соответствуют адакитовой, а восточного – андезит-дацит-ри-

олитовой сериям [Самсонов и др., 2001; Самсонов, 2004].

В геодинамической эволюции Костомукшской структуры выделяются два основных

этапа развития: аккреционный и коллизионно-орогенный [Кожевников, 2000]. На ранней стадии в обстановке активной континентальной окраины происходило формирование океанического мафического плато (ниемиярвинская и рувинваарская свиты), окраинно-континентальной вулканической дуги (шурловаарская свита) и задугового бассейна (гимольская серия), обдукция верхней части океанического плато, находившейся на уровне функционирования гидротермальных ячеек [Puchtel et al., 1998], на периферическую островную дугу с последующим углублением окраинно-континентального бассейна. Прогрессирующее латеральное сжатие приводило к совмещению доменов, образованных в разных геодинамических обстановках. На коллизионно-орогенном этапе развития структуры при интенсивном сжатии и поперечном укорочении происходила трансформация коллажированного разреза, обусловленная полихронными складчатыми и сдвиговыми деформациями, гранитоидным магматизмом, метаморфизмом и метасоматозом.

Деформации коллизионно-орогенной стадии развития структуры происходили с образованием системы крупных параллельных продольных складок северо-восточного простирания и субмеридиональных северо-вос-

точных сдвиговых зон, обусловленных субмеридиональным сжатием, сопровождавшимся внедрением даек габбро, андезитов, дацитов и диорит-гранодиоритовых интрузий сануки-тоидной серии (~2,72 млрд л.). В восточной части структуры происходило формирование плагиогранитпорфиров, секущих сланцы гимольской серии. Поздняя коллизионная стадия сопровождалась внедрением калиевых гранитов Шурловаарского (2,7 млрд л.), Ниемиярвинского и Восточного массивов. Метаморфические преобразования и метасоматические изменения соответствовали эпидот-амфиболитовой – амфиболитовой фации, пик высокотемпературного метаморфизма зафиксирован по результатам Sm-Nd-датирования минералов кислых metavулканитов контоксской серии ( $2757 \pm 113$  млн л.) и U-Pb-датирования сфенов из ТТГ-гранитоидов западного обрамления структуры ( $2690 \pm 5$  млн л.) [Самсонов, 2004 и ссылки в ней]. Протерозойская активизация Костомукшской зеленокаменной структуры сопровождалась ее блокировкой, внедрением по субширотным и северо-западным разломам габброидов и лампроитов.

Объектами данного исследования (рис. 2) являются метакоматииты рувинваарской свиты контоксской серии, преобразованные в хлорит-

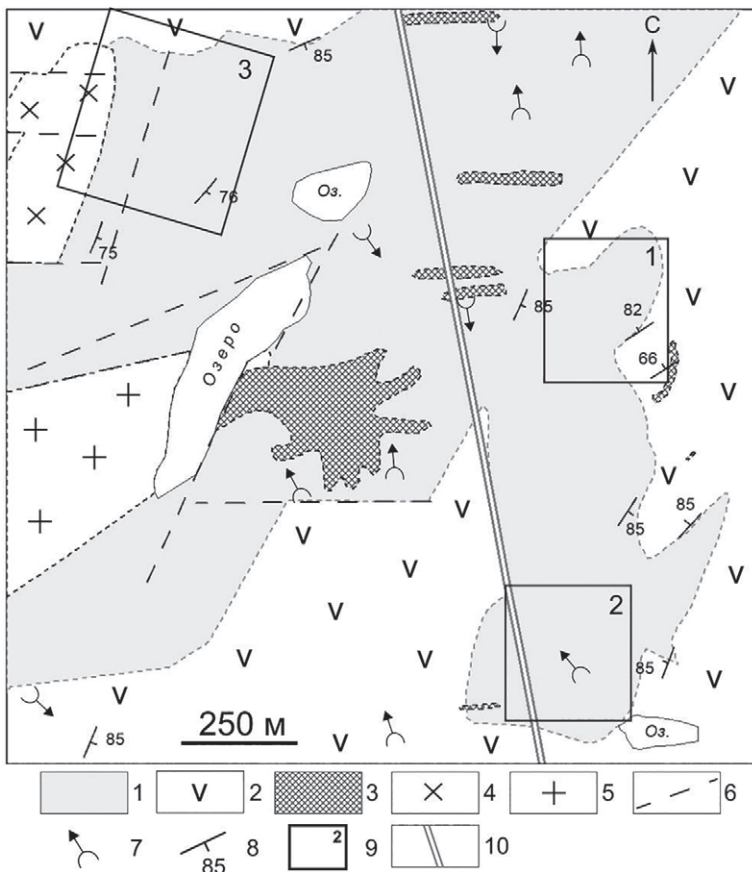


Рис. 2. Схема геологического строения мафитовой толщи в районе исследований с местоположением участков месторождения талькового камня Озерки и проявления Пентинсуо (составлена с использованием данных В. Я. Горьковца [Стратиграфия..., 1992] и Л. В. Кулешевиц [2004]):

1 – метакоматииты; 2 – metabазальты; 3 – метагаббро; 4 – диориты; 5 – гранит-порфиры; 6 – тектонические нарушения; 7 – направление кровли лавового потока; 8 – элементы залегания сланцеватости; 9 – контуры участков: 1 – Озерки-1, 2 – Зеленая горка, 3 – Пентинсуо; 10 – дорога

Fig. 2. Schematic geological map of mafic sequence in the studied area and the location of the Ozerki soapstone deposit prospects and Pentinsuo occurrence (compiled with the use of the data by V. Ya. Gorkovetz [Stratigrafiya..., 1992] and [Kuleshevich, 2004]):

1 – metakomatiites; 2 – metabasalts; 3 – metagabbro; 4 – diorite; 5 – granite-porphyrus; 6 – faults; 7 – direction of the lava flowtop; 8 – schistosity; 9 – prospects outline: 1 – Ozerki-1, 2 – Zelenaya gorka, 3 – Pentinsuo; 10 – road

карбонат-тальковые и карбонат-хлорит-тальковые породы (тальковый камень), имеющие практическое значение. Залежи талькового камня приурочены к линзе коматиитовых перидотитов (проявление Пентинсуо), а также к толще переслаивающихся дифференцированных и недифференцированных (массивных) лавовых потоков и лавобрекчий коматиитов (месторождение Озерки, включающее участки Озерки-1 и Зеленая горка). Геология залежей и минералого-петрографические особенности метакоматиитов детально рассмотрены в работе [Климовская, Иванов, 2018].

Образование талькового камня контролировалось зонами разрывных нарушений северо-восточного простирания, сформированными на позднеорогенном этапе деформаций. С данными тектонически ослабленными зонами, сопровождающимися брекчированием и рассланцеванием, пространственно ассоциируют дайки основных пород мощностью от 1,2 до 5 м, внедрение которых, вероятно, предшествовало формированию талькового камня. На контактах даек и вмещающих метаультрамафитов фиксируется развитие реакционной метасоматической зональности, включающей зоны хлорит-амфиболовых, амфиболовых, (хлорит)-тальковых, биотитовых пород. Породы в приконтактных зонах рассланцованные, полосчатые.

## Материалы и методы

Для исследования были отобраны образцы доломита из карбонатных прожилков в карбонат-хлорит-тальковых породах из керна скважин на месторождении Озерки (4 пробы) и проявлении Пентинсуо (1 проба). Анализ изотопного состава углерода и кислорода карбонатов выполнен в ЦКП «Геонаука» ИГ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, аналитик И. В. Смоле-

ва). Разложение карбонатов в ортофосфорной кислоте и измерение изотопного состава углерода и кислорода методом проточной масс-спектрометрии в режиме постоянного потока гелия (CF-IRMS) производились на аналитическом комплексе фирмы ThermoFisher Scientific (Бремен, Германия), включающем в себя систему подготовки и ввода проб GasBench II, соединенную с масс-спектрометром DELTA V Advantage. Значения  $\delta^{13}\text{C}$  даны в промилле относительно международного стандарта PDB,  $\delta^{18}\text{O}$  – стандарта SMOW. При калибровке использованы международные стандарты NBS 18 и NBS 19. Ошибка определения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  составила  $\pm 0,15\text{‰}$  ( $1\sigma$ ).

Изотопные характеристики  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  флюида рассчитывались для температурного диапазона 390–430 °С, основанного на оценке температурного режима формирования изученных пород с использованием доломит-кальцитового геотермометра [Климовская, Иванов, 2018]. При этом допускалось, что в системах «карбонат –  $\text{CO}_2$ » изотопное равновесие между отлававшими минералами и гидротермальным флюидом установилось при температуре минералообразования и сохранялось после их отложения.

## Результаты и обсуждение

Исследование соотношений стабильных изотопов углерода в доломите месторождения Озерки показало, что значения  $\delta^{13}\text{C}$  лежат в узком интервале от  $-2,29$  до  $-1,1\text{‰}$  (табл.). Изотопный состав углерода доломита проявления Пентинсуо характеризуется близким значением  $-2,7\text{‰}$ , что свидетельствует о единстве источника флюидов изучаемых объектов.

Рассчитанные в соответствии с уравнением фракционирования в системе «доломит –  $\text{CO}_2$ » [Ohmoto, Rye, 1979] соот-

Изотопный состав углерода и кислорода карбонатов и расчетный изотопный состав флюида при формировании талькового камня месторождения Озерки и проявления Пентинсуо

Carbon and oxygen isotope composition of carbonates and calculated isotope composition of fluid under the soapstone formation at the Ozerki deposit and Pentinsuo occurrence

№ образца Sample no.	Изотопный состав карбоната Isotope composition of carbonate		Изотопный состав флюида при различных температурах Isotope composition of fluid at different temperatures			
	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰ (SMOW)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ , ‰		$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ , ‰	
			390 °C	430 °C	390 °C	430 °C
Oz5–36.36	-1,27	9,49	0,8	0,9	5,6	6,2
Oz6–12.06	-1,4	10,44	0,7	0,8	6,5	7,1
Oz7–18.54	-2,29	11,53	-0,2	-0,1	7,6	8,2
Ozr2–39.22	-1,1	10,43	1,0	1,1	6,5	7,1
Ps2–5.84	-2,7	12,38	-0,6	-0,5	8,4	9,1



ношения изотопов углерода в минералообразующем флюиде  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ , равновесном с доломитом, составляют  $-0,2...+1,1$  ‰ на месторождении Озерки и  $-0,6...-0,5$  ‰ на проявлении Пентинсуо.

При сопоставлении соотношений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  флюида с изотопным составом основных резервуаров углерода устанавливается их соответствие значениям карбонатов, формировавшихся из морской воды ( $\delta^{13}\text{C} \sim 0$  ‰) [Фор, 1989]. Соотношения стабильных изотопов кислорода в карбонатах месторождения Озерки и проявления Пентинсуо характеризуются близкими значениями: от  $+9,5$  до  $+11,5$  и  $12,4$  ‰ соответственно.

Изотопный состав кислорода воды минералообразующего флюида  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  в равновесии с карбонатом, рассчитанный по уравнению фракционирования «доломит –  $\text{H}_2\text{O}$ » [Zheng, 1999], варьирует от  $+5,6$  до  $+8,2$  ‰ на месторождении Озерки и от  $+8,4$  до  $+9,1$  ‰ на проявлении Пентинсуо. Расчетные значения  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  позволяют предполагать участие в минералообразовании воды метаморфогенного и/или магматогенного происхождения. Однозначная идентификация источника воды затруднена вследствие частичного перекрытия диапазонов значений  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  первично-магматического флюида ( $+5,5...+10$  ‰ [Taylor, 1997]) и флюида, образованного при дегидратации пород в результате метаморфизма ( $+5...+25$  ‰ [Taylor, 1997]) (рис. 3), а также их изменения при взаимодействии с вмещающими породами.

Полученные значения  $\delta^{13}\text{C}$  карбонатов близки к соотношениям изотопов углерода, характерным для мезоархейских морских карбона-

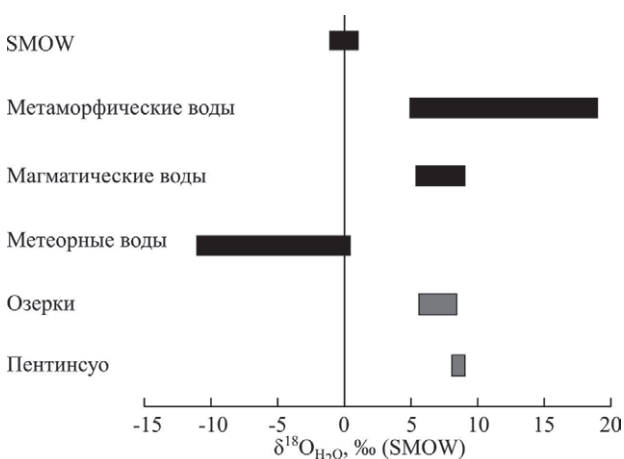


Рис. 3. Изотопный состав кислорода минералообразующего флюида месторождения Озерки и проявления Пентинсуо

Fig. 3. Oxygen isotope composition of mineralizing fluid at the Ozerki deposit and Pentinsuo occurrence

тов Южной Африки ( $-0,6...+2,9$  ‰ по: [Schidlowski et al., 1975];  $-1,2...+3,0$  ‰ по: [Veizer, 1989]), сопоставимы со значениями  $\delta^{13}\text{C}$  кальцитов из гидротермально-измененных метабазальтов зеленокаменных поясов Западной Австралии, Канады [Fyon, 1983; Golding et al., 1987; Shibuya et al., 2012], а также находятся в пределах диапазона значений  $\delta^{13}\text{C}$  карбонатов из современных базальтов [Coggon, 2006], испытавших гидротермальный метаморфизм морского дна (рис. 4).

Соотношения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  минералообразующего флюида, соответствующие величинам изотопного состава углерода морских карбонатов, а также факт отсутствия в стратиграфическом разрезе Костомукшской зеленокаменной структуры карбонатных пород позволяют предположить, что наиболее вероятным источником углерода флюида выступали карбонаты гидротермально измененных базальтов и коматиитов контоксской серии, формировавшихся в обстановке океанического плато. Считается, что карбонаты, отлагавшиеся в гидротермально измененных под воздействием морской воды вулканических породах и характеризующиеся значениями  $\delta^{13}\text{C}$  близкими к  $0$  ‰, являются одним из основных дометаморфических резервуаров углерода в архейских зеленокаменных поясах [Golding et al., 1987; Groves et al., 1988]. Реликты гидротермально измененной океанической коры обнаружены в ряде разновозрастных зеленокаменных поясов: Исуа, Северный полюс, Марбл-Бар, Барбертон, Кливервиль, Абитиби, Норсман-Вилуна.

Предполагается, что гидротермальные изменения были вызваны циркуляцией морской воды в горячей вулканической толще вследствие процессов, аналогичных тем, которые происходят в современных спрединговых зонах. Результирующие региональные изменения, включающие спилитизацию, окварцевание и карбонатизацию, контролировались пористостью/проницаемостью вулканических толщ и их стратиграфическим положением [Golding et al., 1987].

Поступление в минералообразующий флюид  $\text{CO}_2$  за счет карбонатов при высоких температурах возможно в результате реакций растворения и декарбонатизации [Ohmoto, Rye, 1979]. При этом растворение карбонатов сопровождается образованием  $\text{CO}_2$ , изотопически близкой к исходным карбонатам, а реакции декарбонатизации приводят к обогащению изотопом  $^{13}\text{C}$  до  $3$  ‰.

Полученные значения  $\delta^{13}\text{C}$  свидетельствуют либо о доминирующей роли процессов растворения дометаморфических карбонатов,

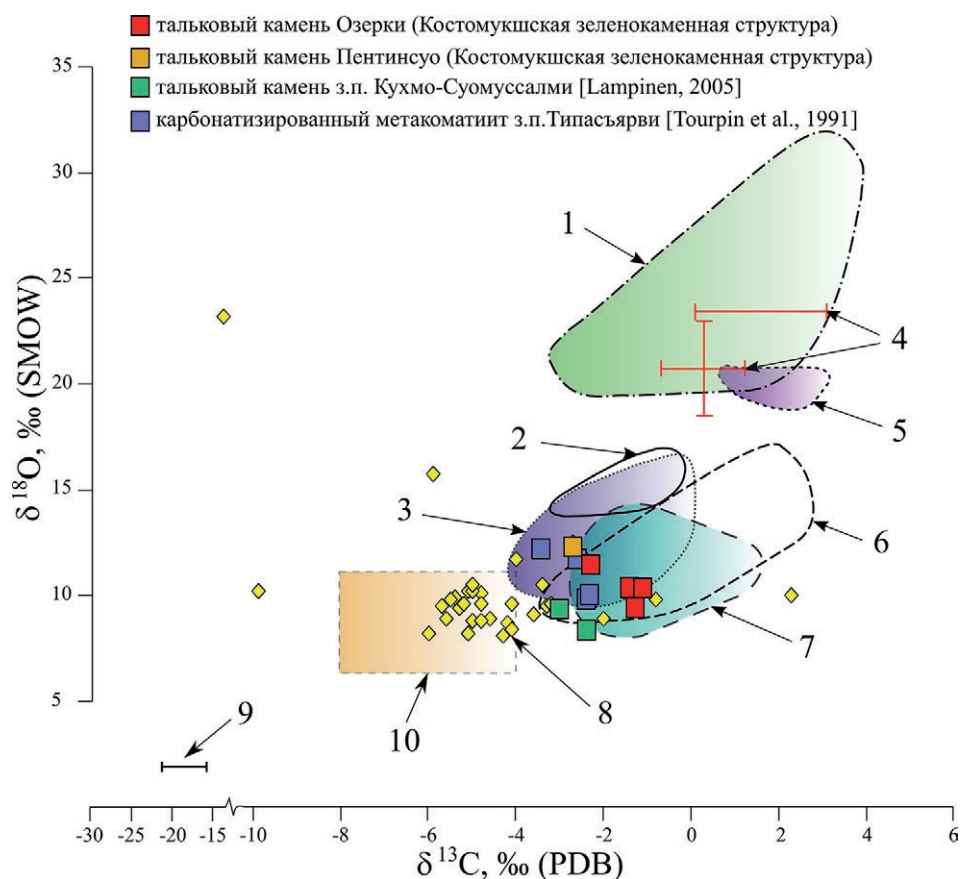


Рис. 4. Изотопный состав углерода и кислорода исследованных карбонатов Костомукшской зеленокаменной структуры в сопоставлении с карбонатами из различной степени карбонатизированных метакоматиитов других архейских зеленокаменных поясов (з. п.) и различными резервуарами углерода:

1 – кальцит в современных СОХ-базальтах [Coggon, 2006]; 2 – карбонат в гидротермально измененных метабазах з. п. Абитибид, р-н Тимминс [Fyon et al., 1980]; 3 – карбонат в карбонатизированных метакоматиитах з. п. Абитибид [Schandl, Naldrett, 1992]; 4 – архейские известняки [Schidlowski et al., 1975; Veizer, 1989]; 5 – карбонат в кровельных зонах гидротермально измененных метакоматиитов з. п. Барбертон [Stoute, 2007]; 6 – кальцит в гидротермально измененных метабазах з. п. Кливервилль [Shibuya et al., 2012]; 7 – кальцит в гидротермально измененных метабазах з. п. Норсман-Вилуна [Golding et al., 1987]; 8 – карбонат в тальк-карбонатных породах, приуроченных к разломам в толще метакоматиитов з. п. Норсман-Вилуна [Groves et al., 1988]; 9 – восстановленный углерод в углеродсодержащих сланцах Костомукшской структуры [Горьковец и др., 1991]; 10 – карбонатиты [Valley, 1986]

Fig. 4. Carbon and oxygen isotope composition of the investigated carbonates from the Kostomuksha greenstone structure and comparison with different carbonatized metakomatiites from other greenstone belts (g. b.) and specified carbon reservoirs:

1 – calcite in modern MORB [Coggon, 2006]; 2 – carbonate in sea-floor altered metabasalts in the Abitibi g. b. [Fyon et al., 1980]; 3 – carbonate in carbonatized metakomatiite in the Abitibi g. b. [Schandl, Naldrett, 1992]; 4 – Archean limestones [Schidlowski et al., 1975; Veizer, 1990]; 5 – carbonate in komatiitic flow top alteration zones in the Barberton g. b. [Stoute, 2007]; 6 – calcite in sea-floor altered metabasalts in the Cleaverville area [Shibuya et al., 2012]; 7 – calcite in sea-floor altered metabasalts in the Norseman-Wiluna g. b. [Golding et al., 1987]; 8 – carbonate in talc-carbonate rocks related to fault-controlled alteration in the Norseman-Wiluna g. b. metakomatiites [Groves et al., 1988]; 9 – reduced C in Kostomuksha black schists [Gor'kovec et al., 1991]; carbonatitic field [Valley, 1986]

либо о вовлечении изотопно легкого источника углерода. Некоторое облегчение изотопного состава углерода карбонатов исследуемых объектов, вероятно, обусловлено окислением

и/или гидролизом восстановленного углерода углеродсодержащих сланцев, которые отмечаются в отложениях коматиит-базальтовой ассоциации в виде прослоев мощностью

1–1,5 м и протяженностью десятки – первые сотни метров. Содержание углеродистого вещества в сланцах составляет 1,9–4 %, и по своему агрегатному состоянию оно представлено скрытокристаллическим графитом. Значение  $\delta^{13}\text{C}$  в углеродсодержащих сланцах составляет от –16,2 до –21,8 ‰, что указывает на биогенную природу углерода [Горьковец и др., 1991].

Для интерпретации расчетных значений изотопного состава кислорода воды минералообразующего флюида  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  могут быть предложены следующие гипотезы происхождения флюида.

Согласно первой гипотезе, прогрессивный метаморфизм гидротермально измененных базальтов, коматиитов и углеродсодержащих сланцев контоксской серии генерировал большой объем метаморфогенного  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  флюида в ходе потери летучих при переходе от зеленосланцевой к амфиболитовой фации. Результаты термодинамического моделирования [Powell et al., 1991; Elmer, 2006] демонстрируют, что максимальное количество флюида выделяется при разложении хлорита и серпентина с образованием амфибола и оливина соответственно. Соотношение  $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$  в выделившемся флюиде является функцией  $P$  и  $T$  и варьирует от  $\leq 10$  до 40 %  $\text{CO}_2$  для низких и высоких геотермических градиентов соответственно [Phillips, 1993], а также определяется долей карбоната, присутствующего в породе до прогрессивного метаморфизма [Elmer, 2006].

Согласно исследованиям [Colvine, 1984 и ссылки в ней], в результате взаимодействия архейских базальтов, изливавшихся в подводных условиях, с большим объемом морской воды исходные значения  $\delta^{18}\text{O}$  свежих базальтов (от +5 до +8 ‰) эволюционируют в сторону более тяжелых значений в диапазоне от +6 до +12 ‰. Изотопное уравнивание порового морского водного флюида с мафитовыми породами и осадками в условиях низкой и средней ступени зеленосланцевой фации (т. е. после гидротермальной активности морской воды) будет изменять его  $\delta^{18}\text{O}$  с начальных значений 0...+3 ‰ до более тяжелых в диапазоне от +5 до +8 ‰. Породы коматиитовой серии в результате гидротермального воздействия морской воды могут характеризоваться как облегчением значений  $\delta^{18}\text{O}$  до +3 ‰, так и утяжелением до +9 ‰ [Beaty, Taylor, 1982] в зависимости от минерального состава. В процессе прогрессивного метаморфизма до высоких ступеней значения  $\delta^{18}\text{O}$  изверженных и осадочных пород остаются относительно постоянными до условий, приближающихся к анатексису.

Значения изотопного состава кислорода воды  $\delta^{18}\text{O}$  флюидов, образованных в результате метаморфической дегидратации, по существу неотличимы от  $\delta^{18}\text{O}$  исходных пород. Таким образом, эти данные показывают, что в результате прогрессивного метаморфизма архейские базальты и коматииты, испытывавшие ранние гидротермальные изменения под воздействием морской воды, а также осадки будут изменять  $\delta^{18}\text{O}$  поровых и дегидратационных флюидов в диапазоне от +3 до +12 ‰. Полученные в настоящей работе значения изотопного состава воды минералообразующего флюида (от +5,6 до +9,1 ‰) согласуются с этими данными.

Вторая гипотеза заключается в буферизации флюида, отделившегося от позднеорогенных интрузий гранитоидов, прорываемыми ими породами коматиит-базальтовой ассоциации Костомукшской структуры. По мере проникновения магматического флюида происходили реакции изотопного обмена между флюидом и породами, вследствие чего флюид приобретал характеристики вмещающих пород и значения  $\delta^{18}\text{O}$ , схожие со значениями  $\delta^{18}\text{O}$  метаморфического флюида. Учитывая тесную пространственно-временную связь процессов кислого магматизма и метаморфизма, возможно, минералообразующий флюид имел смешанную магматогенно-метаморфогенную природу. Следует отметить, что полученные значения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  исследуемых карбонатов сопоставимы с таковыми для архейских орогенных мезотермальных золоторудных месторождений ( $\delta^{13}\text{C}$  от –10 до 0 ‰ [Kerrich, 1989, 1990; Goldfarb et al., 2005],  $\delta^{18}\text{O}$  от +3 до +16 ‰ [Colvine et al., 1988; Kerrich, 1990; McCuaig, Kerrich, 1998]).

## Выводы

В результате исследования соотношений стабильных изотопов углерода и кислорода жильных карбонатов из гидротермально-метасоматически преобразованных мезоархейских метакоматиитов Костомукшской зеленокаменной структуры установлено, что минералообразующий флюид, ответственный за образование залежей талькового камня на месторождении Озерки и проявлении Пентинсуо, характеризовался узкими диапазонами значений изотопного состава углерода растворенной  $\text{CO}_2$  ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  от –0,6 до +1,1 ‰) и кислорода воды ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  от +5,6 до +9,1 ‰).

Полученные изотопные данные свидетельствуют, что флюид образовался в результате процессов дегидратации, декарбонатизации и растворения карбонатов при прогрессивном

метаморфизме гидротермально измененных (метаморфизм морского дна) зеленокаменных пород в глубоких уровнях коматиит-базальтовой толщи Костомукшской структуры и/или в результате изотопного обмена магматического флюида позднеорогенных гранитных интрузий с породами коматиит-базальтовой ассоциации.

Формирование залежей талькового камня, предположительно, связывается с поздним коллизионно-орогенным этапом развития структуры и происходило после главных деформационных процессов, сопряженных с внедрением гранитоидов, на регрессивной стадии регионального метаморфизма в тектонически ослабленных зонах северо-восточного простирания.

Автор благодарит д. г.-м. н. В. Л. Андреичева за помощь в проведении изотопных исследований.

Работа выполнена в рамках темы НИР ПФНИ ГАН «Минерагения, технологическая и эколого-экономическая оценка потенциальных минерально-сырьевых ресурсов территории Республики Карелия» (№ гос. рег. АААА-А18-118020290175-2).

## Литература

- Горьковец В. Я., Раевская М. Б., Белоусов Е. Ф., Инина К. А. Геология и металлогения Костомукшского железорудного месторождения. Петрозаводск: Карелия, 1981. 143 с.
- Горьковец В. Я., Раевская М. Б., Володичев О. И., Голованова Л. С. Геология и метаморфизм железисто-кремнистых формаций Карелии. Л.: Наука, 1991. 176 с.
- Климовская Е. Е., Иванов А. А. Минералого-петрографические особенности метакоматиитов Костомукшской зеленокаменной структуры (Карелия) // Литосфера. 2018. № 6. С. 870–891. doi: 10.24930/1681-9004-2018-18-6-870-891
- Кожевников В. Н. Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2000. 223 с.
- Конди К. Архейские зеленокаменные пояса. М.: Мир, 1983. 400 с.
- Кулешевич Л. В. Эволюция эндогенных режимов и стадийность золотого рудообразования в Костомукшской структуре, Карелия // ДАН. 2004. Т. 396, № 6. С. 808–812.
- Лобач-Жученко С. Б., Арестова Н. А., Милькевич Р. И., Левченко О. А., Сергеев С. А. Стратиграфический разрез Костомукшской структуры (верхний архей), реконструированный на основе геохронологических, геохимических и изотопных данных // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2000. Т. 8, № 4. С. 3–10.
- Самсонов А. В. Эволюция магматизма гранит-зеленокаменных областей Восточно-Европейского кратона: автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. М., 2004. 48 с.
- Самсонов А. В., Берзин Р. Г., Заможная Н. Г., Щипанский А. А., Бибилова Е. В., Кирнозова Т. И., Конилов А. Н. Процессы формирования раннедокембрийской коры северо-запада Карелии, Балтийский щит: результаты геологических, петрологических и глубинных сейсмических (профиль 4В) исследований // Глубинное строение и эволюция земной коры восточной части Фенноскандинавского щита: профиль Кемь-Калевала / Отв. ред. Н. В. Шаров. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2001. С. 109–143.
- Стратиграфия докембрия Карелии. Опорные разрезы верхнеархейских отложений. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1992. 190 с.
- Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
- Arndt N. T., Leshner C. M., Barnes S. J. Komatiite. Cambridge: Cambridge Univ. Press., 2008. 467 p.
- Beatty D. W., Taylor H. P. Jr. The oxygen isotope geochemistry of komatiites: evidence for water-rock interaction // Komatiites / Eds. N. T. Arndt, E. G. Nisbet. London, 1982. P. 267–278.
- Coggon R. M., Teagle D. A. H., Cooper M. J., Hayes T. E. F., Green D. R. H. Data report: compositions of calcium carbonate veins from superfast spreading rate crust, ODP Leg 206 // Eds. D. A. H. Teagle, D. S. Wilson, G. D. Acton, D. A. Vanko. Proceed. Ocean Drilling Program, Sci. Results. Vol. 206: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1–6. 2006. doi: 10.2973/odp.proc.sr.206.002.2006
- Colvine A. C., Andrews A. J., Cherry M. E., Durocher M. E., Fyon A. J., Lavigne M. J., Macdonald A. J., Marmont S., Poulsen K. H., Springer J. S., Troop D. G. An integrated model for the origin of Archean lode gold deposits // Ontario Geol. Survey, open-file report 5524. 1984. 98 p.
- Colvine A. C., Fyon J. A., Heather K. B., Marmont S., Smith P. M., Troop D. G. Archean lode gold deposits in Ontario // Ontario Geol. Survey, Misc. Paper 139. 1988. 136 p.
- Elmer F. L., White R. W., Powell R. Devolatilization of metabasic rocks during greenschist-amphibolite facies metamorphism // J. Metamorph. Geol. 2006. Vol. 24. P. 497–513. doi: 10.1111/j.1525-1314.2006.00650.x
- Fyon J. A., Schwarcz H. P., Crocket J. H. Carbon and oxygen isotope chemistry of replacement carbonates from the Timmins-Porcupine Gold Camp // Summary of Research, Geoscience Research Grant Program, Ontario Geol. Survey, Misc. Paper 93. 1980. P. 72–83.
- Fyon J. A., Schwarcz H. P., Crocket J. H., Knyf M. Grant 49: Gold exploration potential using oxygen, carbon and hydrogen stable isotope systematics of carbonatized rock and quartz veins, Timmins area // Ontario Geol. Survey, Misc. Paper 103. 1982. P. 59–64.
- Fyon J. A., Crocket J. H., Schwarcz H. P. Application of stable isotope studies to gold metallogeny in the Timmins-Porcupine camp // Ontario Geol. Survey, open-file report 5464. 1983. 182 p.

Goldfarb R. J., Baker T., Dubé B., Groves D. I., Hart C. J. R., Gosselin P. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes // *Economic Geol.* 100<sup>th</sup> Anniv. Vol. 2005. P. 407–450.

Golding S. D., Groves D. I., VcNaughton N. J., Barley M. E., Rock N. M. S. Carbon isotopic composition of carbonates from contrasting alteration styles in supracrustal rocks of the Norseman-Wiluna Belt, Yilgarn Block, Western Australia: Their significance to the source of Archean auriferous fluids // *Recent Advances in Understanding Precambrian Gold Deposits* / Eds. S. E. Ho, D. I. Groves; Geol. Dep. and Univ. Extension, Univ. of Western Australia, Publication No. 11. 1987. P. 215–238.

Golding S. D., McNaughton N. J., Barley M. E., Groves D. I., Ho S. E., Rock N. M. S., Turner J. V. Archean carbon and oxygen reservoirs: their significance for fluid sources and circulation paths for Archean mesothermal gold deposits of the Norseman-Wiluna Belt, Western Australia // *Econ. Geol. Monogr.* 1989. Vol. 6. P. 376–388. doi: 10.5382/Mono.06.29

Groves D. I., Golding S. D., Rock N. M. S., Barley M. E., McNaughton N. J. Archean carbon reservoirs and their relevance to the fluid source for gold deposits // *Nature.* 1988. Vol. 331. P. 253–257.

Kerrick R. Archean gold: relation to granulite formation or felsic intrusions? // *Geology.* 1989. Vol. 17. P. 1011–1015. doi: 10.1130/0091-7613(1989)017<1011:AGRTGF>2.3.CO;2

Kerrick R. Carbon-isotope systematic of Archean Au-Ag vein deposits in the Superior Province // *Can. J. Earth Sci.* 1990. Vol. 27. P. 40–56. doi: 10.1139/e90-004

Lampinen H. Karbonaattituminen ja siihen liittyvä kultamalmin muodostus arkeaisella Kuhmon-Suomussalmen vihreäkivivyöhykkeellä (Carbonatization and associated gold mineralization in the Archean Kuhmo-Suomussalmi Greenstone Belt): Master's Thesis. 2005. 174 p.

McCuaig T. C., Kerrich R. P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematic // *Ore Geol. Rev.* 1998. Vol. 12. P. 381–453. doi: 10.1016/S0169-1368(98)80002-4

Ohmoto H., Rye R. O. Isotopes of sulfur and carbon // *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* / Eds H. L. Barnes. New York: John Wiley and Sons, 1979. P. 509–567.

Phillips G. N. Metamorphic fluids and gold // *Mineralogical magazine.* Vol. 57, iss. 388. 1993. P. 365–374. doi: 10.1180/minmag.1993.057.388.02

Powell R., Will T. M., Phillips G. N. Metamorphism in Archean greenstone belts: calculated fluid composi-

tions and implications for gold mineralization // *J. Metamorph. Geol.* 1991. Vol. 9. P. 141–150. doi: 10.1111/j.1525-1314.1991.tb00510.x

Puchtel I. S., Hofmann A. W., Mezger K., Jochum K. P., Shchipansky A. A., Samsonov A. V. Oceanic plateau model for continental crustal growth in the Archean: a case study from the Kostomuksha greenstone belt, NW Baltic Shield // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1998. Vol. 155. P. 57–74. doi: 10.1016/S0012-821X(97) 00202-1

Schandl E. S., Naldrett A. J. CO<sub>2</sub> metasomatism of serpentinites, south of Timmins, Ontario // *Can. Mineral.* 1992. Vol. 30. P. 93–108.

Schidlowski M., Eichmann R., Junge C. E. Precambrian sedimentary carbonates: carbon and oxygen isotope geochemistry and implications for the terrestrial oxygen budget // *Precambrian Res.* 1975. Vol. 2. P. 1–69.

Shibuya T., Tahata M., Kitajima K., Ueno Y., Komiya T., Yamamoto S., Igisu M., Terabayashi M., Sawaki Y., Takai K., Yoshida N., Maruyama S. Depth variation of carbon and oxygen isotopes of calcites in Archean altered upper oceanic crust: implications for the CO<sub>2</sub> flux from ocean to oceanic crust in the Archean // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2012. Vol. 321–322. P. 64–73. doi: 10.1016/j.epsl.2011.12.034

Stoute J. E. Carbonated Sections from komatiite flow-top alteration zones in the Barberton greenstone belt: implications for near-surface archean environments // *LSU Master's Theses.* 2984. 2007. 112 p.

Taylor H. P. Jr. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits // *Geochemistry of hydrothermal ore deposits.* N. Y.: John Wiley and Sons, 1997. P. 229–302.

Tourpin S., Gruau G., Blais S., Fourcade S. Resetting of REE, and Nd and Sr isotopes during carbonization of a komatiite flow from Finland // *Chem. Geol.* 1991. Vol. 90. P. 15–29. doi: 10.1016/0009-2541(91)90030-U

Valley J. R. Stable isotope geochemistry of metamorphic rocks // *Stable isotopes in high temperature geological processes* / Eds. J. W. Valley, H. P. Taylor, J. R. O'Neil. 1986. P. 445–489.

Veizer J., Hoefs J., Lowe D. R., Thurston P. C. Geochemistry of Precambrian carbonates: II. Archean greenstone belts and Archean sea water // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1989. Vol. 53, iss. 4. P. 859–871. doi: 10.1016/0016-7037(89)90031-8

Zheng Y. F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals // *Geochem. J.* 1999. Vol. 33. P. 109–126. doi: 10.2343/geochemj.33.109

Поступила в редакцию 31.01.2020

## References

For G. *Osnovy izotopnoi geologii* [Principles of isotope geology]. Moscow: Mir, 1989. 590 p.

Gor'kovets V. Ya., Raevskaya M. B., Belousov E. F., Inina K. A. *Geologiya i metallogeniya Kostomukshskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya* [Geology and metallogeny of the Kostomuksha iron ore deposit]. Petrozavodsk: Kareliya, 1981. 143 p.

Gor'kovets V. Ya., Raevskaya M. B., Volodichev O. I., Golovanova L. S. *Geologiya i metamorfizm zhelezistokremnistykh formatsii Karelii* [Geology and metamorphism of cherty iron-formations of Karelia]. Leningrad: Nauka, 1991. 173 p.

Klimovskaya E. E., Ivanov A. A. *Mineralogo-petrograficheskie osobennosti metakomatiitov Kostomuksh-*

skoj zelenokamennoi struktury (Kareliya) [Mineralogical and petrographic features of metakomatiites of the Kostomuksha greenstone structure (Karelia)]. *Litosfera* [Lithosphere]. 2018. No. 6. P. 870–891. doi: 10.24930/1681-9004-2018-18-6-870-891

*Kozhevnikov V. N.* Arkheiskie zelenokamennye poyasa Karelskogo kratona kak akkretionnyye orogeny [Archean greenstone belts of the Karelian craton as accretionary orogens]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2000. 223p.

*Kondi K.* Arkheiskie zelenokamennye poyasa [Archean greenstone belts]. Moscow: Mir, 1983. 400 p.

*Kuleshevich L. V.* Evolyutsiya endogennykh rezhimov i stadiinost' zolotogo rudoobrazovaniya v Kostomukshskoi strukture, Kareliya [Evolution of endogenic regimes and stages of gold ore formation in the Kostomuksha greenstone belt, Karelia]. *DAN* [Dokl. Earth Sci.]. 2004. Vol. 397(5). P. 672–676.

*Lobach-Zhuchenko S. B., Arestova N. A., Mil'kevich R. I., Levchenkov O. A., Sergeev S. A.* Stratigraficheskiy razrez Kostomukshskoi struktury (verkhniy arkhei), rekonstruirovannyi na osnove geokhronologicheskikh, geokhimicheskikh i izotopnykh dannyykh [Stratigraphy of the Kostomuksha belt in Karelia (upper archean) as inferred from geochronological, geochemical, and isotopic data]. *Stratigrafiya. Geol. korrelyatsiya* [Stratigraphy and Geol. Correlation]. 2000. Vol. 8, no. 4. P. 319–326.

*Samsonov A. V.* Evolyutsiya magmatizma granit-zelenokamennykh oblasteri Vostochno-Evropeiskogo kratona [The evolution of magmatism of the granite-greenstone regions of the East European Craton]: DSc (Dr. of Geol.) thesis. Moscow, 2004. 48 p.

*Samsonov A. V., Berzin R. G., Zamozhnyaya N. G., Shchipsanskii A. A., Bibikova E. V., Kirnozova T. I., Konilov A. N.* Protsepy formirovaniya rannedokembriiskoi kory Severo-Zapadnoi Karelii, Baltiiskii shchit: rezul'taty geologicheskikh, petrologicheskikh i glubinykh seismicheskikh (profil' 4V) issledovaniy [Early Precambrian crust-forming processes in NW-Karelia, Baltic Shield: evidences from geological, petrological and deep seismic (4B profiles) studies]. *Glubinnoe stroenie i evolyutsiya zemnoi kory vostochnoi chasti Fennoskandinavskogo shchita: profil' Kem' – Kalevala* [Deep structure and crustal evolution of the Eastern Fennoscandian Shield: Kem – Kalevala reflection profile]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2001. P. 109–143.

*Stratigrafiya dokembriya Karelii. Opornye razrezy verkhnearkhekiskikh otlozhenii* [Precambrian stratigraphy of Karelia. Key sections of the Upper Archean deposits]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1992. 190 p.

*Arndt N. T., Leshner C. M., Barnes S. J.* Komatiite. Cambridge: Cambridge Univ. Press., 2008. 467 p.

*Beatty D. W., Taylor H. P. Jr.* The oxygen isotope geochemistry of komatiites: evidence for water-rock interaction. *Komatiites*. Eds. N. T. Arndt, E. G. Nisbet. London, 1982. P. 267–278.

*Coggon R. M., Teagle D. A. H., Cooper M. J., Hayes T. E. F., Green D. R. H.* Data report: compositions of calcium carbonate veins from superfast spreading rate crust, ODP Leg 206. Eds. D. A. H. Teagle, D. S. Wilson, G. D. Acton, D. A. Vanko. Proceed. Ocean Drilling Programm, Sci. Results. Vol. 206: College Station,

TX (Ocean Drilling Program), 1–6. 2006. doi: 10.2973/odp.proc.sr.206.002.2006

*Colvine A. C., Andrews A. J., Cherry M. E., Duchrocher M. E., Fyon A. J., Lavigne M. J., Macdonald A. J., Marmont S., Poulsen K. H., Springer J. S., Troop D. G.* An integrated model for the origin of Archean lode gold deposits. *Ontario Geol. Survey*, open-file report 5524. 1984. 98 p.

*Colvine A. C., Fyon J. A., Heather K. B., Marmont S., Smith P. M., Troop D. G.* Archean lode gold deposits in Ontario. *Ontario Geol. Survey*, Misc. Paper 139. 1988. 136 p.

*Elmer F. L., White R. W., Powell R.* Devolatilization of metabasic rocks during greenschist-amphibolite facies metamorphism. *J. Metamorph. Geol.* 2006. Vol. 24. P. 497–513. doi: 10.1111/j.1525-1314.2006.00650.x

*Fyon J. A., Schwarcz H. P., Crocket J. H.* Carbon and oxygen isotope chemistry of replacement carbonates from the Timmins-Porcupine Gold camp. *Summary of Research, Geoscience Research Grant Program, Ontario Geol. Survey*, Misc. Paper 93. 1980. P. 72–83.

*Fyon J. A., Schwarcz H. P., Crocket J. H., Knyf M.* Grant 49: Gold exploration potential using oxygen, carbon and hydrogen stable isotope systematics of carbonatized rock and quartz veins, Timmins area. *Ontario Geol. Survey*, Misc. Paper 103. 1982. P. 59–64.

*Fyon J. A., Crocket J. H., Schwarcz H. P.* Application of stable isotope studies to gold metallogeny in the Timmins-Porcupine camp. *Ontario Geol. Survey*, open-file report 5464. 1983. 182 p.

*Goldfarb R. J., Baker T., Dubé B., Groves D. I., Hart C. J. R., Gosselin P.* Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes. *Economic Geol. 100<sup>th</sup> Anniv.* Vol. 2005. P. 407–450.

*Golding S. D., Groves D. I., McNaughton N. J., Barley M. E., Rock N. M. S.* Carbon isotopic composition of carbonates from contrasting alteration styles in supracrustal rocks of the Norseman-Wiluna Belt, Yilgarn Block, Western Australia: Their significance to the source of Archean auriferous fluids. *Recent Advances in Understanding Precambrian Gold Deposits*. Eds. S. E. Ho, D. I. Groves; Geol. Dep. and Univ. Extension, Univ. of Western Australia, Publication no. 11. 1987. P. 215–238.

*Golding S. D., McNaughton N. J., Barley M. E., Groves D. I., Ho S. E., Rock N. M. S., Turner J. V.* Archean carbon and oxygen reservoirs: their significance for fluid sources and circulation paths for Archean mesothermal gold deposits of the Norseman-Wiluna Belt, Western Australia. *Econ. Geol. Monogr.* 1989. Vol. 6. P. 376–388. doi: 10.5382/Mono.06.29

*Groves D. I., Golding S. D., Rock N. M. S., Barley M. E., McNaughton N. J.* Archean carbon reservoirs and their relevance to the fluid source for gold deposits. *Nature*. 1988. Vol. 331. P. 253–257.

*Kerrick R.* Archean gold: relation to granulite formation or felsic intrusions? *Geology*. 1989. Vol. 17. P. 1011–1015. doi: 10.1130/0091-7613(1989)017<1011:AGRTGF>2.3.CO;2

*Kerrick R.* Carbon-isotope systematic of Archean Au-Ag vein deposits in the Superior Province. *Can. J. Earth Sci.* 1990. Vol. 27. P. 40–56. doi: 10.1139/e90-004

Lampinen H. Karbonaattiutumien ja siihen liittyvä kultaalmin muodostus arkeaisella Kuhmon-Suomussalmen vihreäkivivyöhykkeellä (Carbonatization and associated gold mineralization in the Archean Kuhmo-Suomussalmi Greenstone Belt): Master's Thesis. 2005. 174 p.

McCuaig T. C., Kerrich R. P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematic. *Ore Geol. Rev.* 1998. Vol. 12. P. 381–453. doi: 10.1016/S0169-1368(98)80002-4

Ohmoto H., Rye R. O. Isotopes of sulfur and carbon. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Ed. H. L. Barnes. New York: John Wiley and Sons, 1979. P. 509–567.

Phillips G. N. Metamorphic fluids and gold. *Mineralogical magazine*. 1993. Vol. 57, iss. 388. P. 365–374. doi: 10.1180/minmag.1993.057.388.02

Powell R., Will T. M., Phillips G. N. Metamorphism in Archean greenstone belts: calculated fluid compositions and implications for gold mineralization. *J. Metamorph. Geol.* 1991. Vol. 9. P. 141–150. doi: 10.1111/j.1525-1314.1991.tb00510.x

Puchtel I. S., Hofmann A. W., Mezger K., Jochum K. P., Shchipansky A. A., Samsonov A. V. Oceanic plateau model for continental crustal growth in the Archean: a case study from the Kostomuksha greenstone belt, NW Baltic Shield. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1998. Vol. 155. P. 57–74. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00202-1

Schandl E. S., Naldrett A. J. CO<sub>2</sub> metasomatism of serpentinites, south of Timmins, Ontario. *Can. Mineral.* 1992. Vol. 30. P. 93–108.

Schidlowski M., Eichmann R., Junge C. E. Precambrian sedimentary carbonates: carbon and oxygen isotope geochemistry and implications for the terrestrial oxygen budget. *Precambrian Res.* 1975. Vol. 2. P. 1–69.

Shibuya T., Tahata M., Kitajima K., Ueno Y., Komiya T., Yamamoto S., Igisu M., Terabayashi M., Sawaki Y., Takai K., Yoshida N., Maruyama S. Depth variation of carbon and oxygen isotopes of calcites in Archean altered upper oceanic crust: implications for the CO<sub>2</sub> flux from ocean to oceanic crust in the Archean. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2012. Vol. 321–322. P. 64–73. doi: 10.1016/j.epsl.2011.12.034

Stoute J. E. Carbonated Sections from komatiite flow-top alteration zones in the Barberton greenstone belt: implications for near-surface archean environments. *LSU Master's Theses*. 2984. 2007. 112 p.

Taylor H. P. Jr. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.Y.: John Wiley and Sons, 1997. P. 229–302.

Tourpin S., Gruau G., Blais S., Fourcade S. Resetting of REE, and Nd and Sr isotopes during carbonitization of a komatiite flow from Finland. *Chem. Geol.* 1991. Vol. 90. P. 15–29. doi: 10.1016/0009-2541(91)90030-U

Valley J. R. Stable isotope geochemistry of metamorphic rocks. *Stable isotopes in high temperature geological processes*. Eds. J. W. Valley, H. P. Taylor, J. R. O'Neil. 1986. P. 445–489.

Veizer J., Hoefs J., Lowe D. R., Thurston P. C. Geochemistry of Precambrian carbonates: II. Archean greenstone belts and Archean sea water. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1989. Vol. 53, iss. 4. P. 859–871. doi: 10.1016/0016-7037(89)90031-8

Zheng Y. F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. *Geochem. J.* 1999. Vol. 33. P. 109–126. doi: 10.2343/geochemj.33.109

Received January 31, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

### Климовская Екатерина Евгеньевна

научный сотрудник  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: klimeee@gmail.com

## CONTRIBUTOR:

### Klimovskaya, Ekaterina

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: klimeee@gmail.com

УДК 550.424:502.521 (470.22)

## **ВЛИЯНИЕ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ ОНЕЖСКОЙ СТРУКТУРЫ НА ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЧВ ЗАОНЕЖЬЯ**

**Д. С. Рыбаков**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

Приводятся результаты сравнительного исследования почв, развитых на палеопротерозойских породах, преимущественно шунгитовых сланцах, и на шунгитовой морене в лесных и луговых ландшафтах Заонежья. Сравнение проведено по геохимическим спектрам и ранжированным геохимическим рядам различных горизонтов изученных почв и широко представленных в районе пород заонежской свиты людиковийского надгоризонта палеопротерозоя. Нормирование элементного состава осуществлено по кларкам в земной коре и заимствованному из интернет-ресурса среднегеометрическому (фоновому) содержанию элементов в породах заонежской свиты. Последние имеют неординарную геохимическую специализацию (As, Mo, Y, Li, Sc, Be, V, Ba, Cu, Zn и т. д.). В почвах повсеместно наблюдается высокое (выше кларка в земной коре) содержание As, реже – Ag, Zn, Cu, V и Mo. В несколько большей степени это характерно для дерновых почв, не имеющих горизонта лесной подстилки. В минеральных почвенных горизонтах по сравнению с породами накапливаются Nb, Ca, Na, Bi, Al, а в дерновом горизонте к этим элементам добавляются также Ag и Mg. Лесная подстилка аккумулирует Mn, содержание других элементов в ней чаще всего оказывается ниже, чем в гумусово-аккумулятивных горизонтах. Кларки концентрации химических элементов в почвах сближены (выровнены) по сравнению с породами из-за различий в миграционной способности элементов и особенностей участия последних в биогеохимическом круговороте. При этом особенно велики различия в содержании Mo, Be, Li, Y, Sc, As, Cu, Ba, V, Ni, определяющих специализацию «фоновых» пород.

**Ключевые слова:** заонежская свита; почвы; дерновый горизонт; лесные подстилки; кларки концентрации; геохимические спектры; ранжированные геохимические ряды.

### **D. S. Rybakov. THE INFLUENCE OF PALEOPROTEROZOIC FORMATIONS OF THE ONEGA STRUCTURE ON GEOCHEMICAL FEATURES OF ZAONEZHYE SOILS**

The article presents the results of a comparative study of soils developed on Paleoproterozoic rocks, mainly shungite shales, and on the shungite moraine in forest and meadow landscapes of the Zaonezhye region. The comparison was made on the basis of geochemical spectra and ranked geochemical series of different horizons of the studied soils and rocks of the Zaonega Formation of the Ludicovian Superhorizon of the Paleoproterozoic, which are widely represented in the area. The elemental composition was normalized based on clarkes in the earth's crust and the geometric means (background) content of elements in rocks of the Zaonega Formation taken from



the Internet. The rocks have an unusual geochemical specialization (As, Mo, Y, Li, Sc, Be, V, Ba, Cu, Zn, etc.). The content of As, less often Ag, Zn, Cu, V and Mo in the soils is high (above clarkes in the earth's crust) throughout the area. This is somewhat more characteristic of sod soils without the forest floor horizon. Nb, Ca, Na, Bi, Al are accumulated in mineral soil horizons compared to rocks, Ag and Mg are also added to these elements in the sod horizon. The forest floor accumulates Mn, the content of other elements in it is usually lower than in humus-accumulating horizons. Clarke concentrations of chemical elements in soils are more closely aligned with those in rocks due to differences in the migration ability of elements and the way they are involved in biogeochemical cycles. At the same time, differences in the content of Mo, Be, Li, Y, Sc, As, Cu, Ba, V, Ni, which determine the specialization of the "background" rocks, are particularly high.

**Key words:** Zaonega Formation; soils; sod horizon; forest floors; clarkes of concentration; geochemical spectra; ranked geochemical series.

## Введение

Ландшафтно-геохимические обстановки определяются многими факторами, среди которых базовую позицию занимают горные породы. Выходя к поверхности земли, они под воздействием различных процессов становятся поставщиками химических элементов в почву при ее формировании, а также в другие геокомпоненты (донные осадки, поверхностные и подземные воды, растительность и т. д.). В результате в геосистемах отображается целый спектр взаимодействий между геосферами, абиотическими и биотическими геокомпонентами.

Согласно основному геохимическому закону В. М. Гольдшмидта в уточненной формулировке А. И. Перельмана [1989], «геохимия элемента в земной коре определяется как его химическими свойствами, так и величиной кларка». С другой стороны, одни и те же элементы, находящиеся в системе в разных формах (в том числе в различных по устойчивости к выветриванию минералах), при одинаковых параметрах среды миграции обладают разной миграционной способностью [Перельман, 1989].

Заонежский полуостров – уникальная территория в северной части Онежского озера. В геологическом строении Заонежья принимают участие осадочные и магматические породы палеопротерозойского возраста: ятулия, людиковия и калевия (рис. 1). В юго-восточной и восточной частях рассматриваемой в работе территории полуострова залегают карбонатные и вулканогенные породы ятулия. Наиболее широко в районе развиты людиковийские образования (традиционно разделяются на две свиты): 1) шунгитовые и карбонатные породы – заонежская свита, 2) вулканогенные и интрузивные базиты (базальты, долериты, габброиды) – суйсарская свита. В западной части изучаемой территории Заонежья представлены

осадочные образования калевия [Онежская..., 2011; Куликов и др., 2017].

Количество исследуемых химических элементов в тех или иных природных объектах зависит от поставленных исследователем задач и развития приборной базы. Так, для почвообразующих пород Карелии приводятся данные лишь по отдельным элементам [Тойкка и др., 1973]. В том числе для богатых микроэлементами почвообразующих шунгитов установлено следующее содержание (мг/кг): Cu – 93,7; Zn – 47,6; Mn – 1450,8; Co – 15,5; Mo – 4,17; B – 12,3. Карбонатные породы содержат (мг/кг): Cu – 23; Zn – 137; Mn – 1040; Cr – 56; V – 75; Co – 7; Ni – 43 [Онежская..., 2011].

Более широкий спектр элементов изучен при установлении геохимической и металлогенической специализации геологических формаций Онежского рудного района и связанного с ней загрязнения компонентов геологической среды [Кушнеренко и др., 2001]. Самыми специализированными являются палеопротерозойские породы углеродисто-туфоогенно-кремнисто-карбонатной формации с прослоями шунгитсодержащих черных сланцев (заонежская свита). В этих породах отмечено высокое или повышенное содержание следующих элементов (здесь и далее нижний индекс – число раз превышения кларка): Mo<sub>120</sub>, As<sub>102</sub>, U<sub>12</sub>, V<sub>8</sub>, Ag<sub>7</sub>, Zn<sub>3</sub>, Ni<sub>3</sub>, Cu<sub>3</sub>, Pb<sub>3</sub>, Co<sub>2</sub>. В результате наложения эпигенетических и собственно рудных процессов в пределах рудных узлов и отдельных обнаруженных в районе месторождений спектр элементов, в том числе токсичных, расширяется (Bi, Se, U, Mo, V, Pb, Cd, W, Cr, Sn, Cu, As, Li, Zn, Ce, Be, F, возможно Th, Co, Ba, Sr, Tl), а их содержание значительно возрастает. Специализацию пород габбро-долеритовой формации (силлы долеритов) людиковия, которые могут насыщать осадочный разрез в объеме до 30 %, определяют следующие элементы: Cu<sub>4,6</sub>, V<sub>2,6</sub>, Mn<sub>2,2</sub>, Co<sub>1,9</sub>, Zn<sub>1,8</sub>, Ti<sub>1,7</sub> [Кушнеренко и др., 2001].

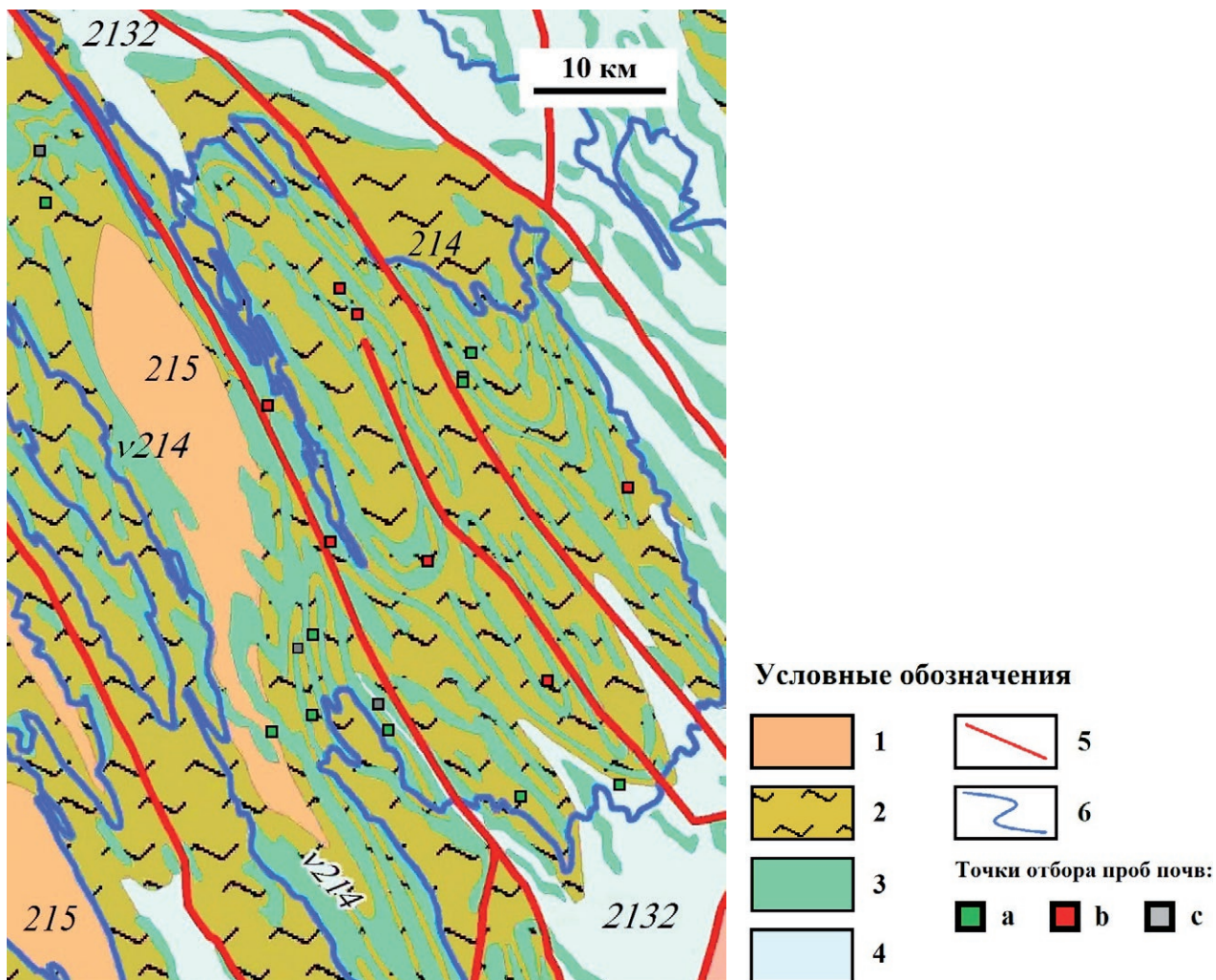


Рис. 1. Фрагмент обзорной геологической карты Юго-Восточной Фенноскандии масштаба 1:750 000 [по: Куликов и др., 2017, с упрощениями]:

1–4 – образования Онежской структуры (палеопротерозой): 1 – калевий: аргиллиты, алевролиты, кварцито-песчаники, конгломераты (215); 2, 3 – людиковий: 2 – высокоуглеродистые породы (шунгиты), аргиллиты, алевролиты, доломиты, базальты (2144), 3 – силлы долеритов, габброиды (v214); 4 – ятулий: доломиты, гипсы, соли, ангидрит-магнезитовые породы, алевролиты, базальты, долериты (2132) (онежская серия); 5 – разломы; 6 – контур Онежского озера.

Точки отбора проб: а, b – шунгитовые почвы: а – с горизонтом лесной подстилки; b – без горизонта лесной подстилки; с – перегнойно-глеевые почвы

Fig. 1. A fragment of the overview geological map of South-Eastern Fennoscandia in scale 1:750,000 [by: Kulikov et al., 2017, with simplifications]:

1–4 – formations of the Onega Paleoproterozoic structure: 1 – Kalevian superhorizon: mudstones, siltstones, quartzitesandstones, conglomerates (215); Ludikovian superhorizon: 2 – high-carbon rocks (shungites), mudstones, siltstones, dolomites, basalts, dolerites (214) (Zaonega Formation), 3 – dolerite sills and gabbroids (v214); 4 – Jatulian superhorizon: dolomites, gypsum, salts, anhydrite-magnesite rocks, siltstones, basalts, dolerites (2132) (Onega series); 5 – faults; 6 – contour of Lake Onega.

Sampling points: a, b – shungite soils: a – with the forest floor horizon; b – without the forest floor horizon; c – humus-gley soils

Геохимическое картирование [Томила и др., 2004] позволило обобщить имеющиеся данные по геохимической специализации геологических формаций северной части европейской территории России, в том числе в Заонежье, определить в них фоновое содержание многих химических элементов. К настоящему времени геохимически наиболее полно изучены широко представленные в Онежской структуре

породы заонежской свиты. Кроме того, содержание все большего числа элементов определяется в породах основного состава (табл. 1).

Четвертичные породы наследуют элементы из коренных пород, однако, как указывается [Кушнеренко и др., 2001], общий уровень природного загрязнения четвертичных отложений значительно ниже по сравнению с докембрийскими образованиями. При этом элемента-

Таблица 1. Фоновое содержание химических элементов, г/т

Table 1. Background content of chemical elements, g/t

	As	Mo	Y	Li	Sc	Be	V	Ba	Cu	Zn	Cr	Ni	Sr	Co	Mn
1	164	30	238	380	105	37	425	3062	143	227	174	121	630	28	1108
2	-	-	38	-	-	-	273	156	288	132	25	27	103	43	2026
3	1,7	1,1	20	32	10	3,8	90	650	47	83	83	58	340	18	1000
	Ag	Pb	Ti	Ga	U	Fe	K	Zr	Al	Na	Mg	Th	Ca	Nb	Bi
1	0,07	14	3842	16	2	33412	10718	71	30625	8767	5403	3	3627	2	0,02
2	-	2,6	13471	-	0,36	144497	7269	162	63112	14132	27662	2	61724	9,2	-
3	0,07	16	4500	19	2,5	46500	25000	170	80500	25000	18700	13	29600	20	0,23*

Примечание. 1 – туфогенно-осадочные породы заонежской свиты (n = 380) [Томила и др., 2004], 2 – долериты лудиковия (n = 13), расчет по данным: [Степанова и др., 2014], 3 – кларки по А. П. Виноградову [1962]. \*Для Bi кларк приведен по Z. Hu и S. Gao [2008] согласно рекомендациям Н. С. Касимова и Д. В. Власова [2015]. Прочерк – данные отсутствуют.

Note. 1 – sedimentary rocks of the Zaonega Formation (n = 380) [Tomilina et al., 2004], 2 – Ludicovian dolerites (n = 13), calculation based on the data from [Stepanova et al., 2014], 3 – clarkes according to A. P. Vinogradov [1962]. \*Clarke of Bi is given after Z. Hu and S. Gao [2008] according to the recommendations of N. S. Kasimov and D. V. Vlasov [2015]. Dash – data is not provided.

ми-токсикантами в первых являются Cu, Co, Mn, Mo, U, реже V, Ni, Zn, Pb, As, Bi, а наибольшим загрязнением характеризуются болотные отложения.

На распространенных в Заонежье шунгитах и основных породах формируются азональные дерновые и дерновые оподзоленные шунгитовые почвы [Тойка и др., 1973]. В другой интерпретации [Морозова, 1991] почвы на шунгитах отнесены к буроземам темноцветным. Согласно современной классификации [Классификация..., 2004], они могут быть причислены к буроземам темным, дерновым почвам, а в случае неполного профиля – к литоземам [Федорец, Бахмет, 2013].

Почвы района отличаются хорошей обеспеченностью многими важными для биоты микроэлементами (Mo, B, Cu, Zn, Co, Mn) [Тойка и др., 1973]. Вместе с тем содержание химических элементов в них часто оказывается значительным, в том числе достигает максимального превышения кларков от 20 (Cu) до 2 (Ba) раз. В связи с этим в почвах Заонежья определен [Кушнеренко и др., 2001] ряд основных элементов-токсикантов, включающий: Cu = Cd > As = Zn > Mo > Pb > Li > U > Co > Ni > Mn > V > Th > Sr > Ba.

Предыдущими исследованиями [Рыбаков, 2004] для почв Заонежья установлена положительная статистическая связь между содержанием Ca и величиной pH. В результате в районе выявлены не только ландшафты кислого и кислого глеевого классов миграции химических элементов в почвенных водах, но и переходного от кислого к кальциевому классу [Рыбаков, 2005a]. Наличие последних обусловлено влиянием распространенных в районе основных и карбонатных пород, а также обломков этих пород в почвах. Особенности накопления и рас-

пределения по профилю генетически различных почв Заонежья V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Mo и Pb рассмотрены Н. Г. Федорец с соавт. [2005].

О. Н. Бахмет и Н. Г. Федорец [2013] отмечено, что несмотря на высокую щебнистость и хорошую водопроницаемость почв, развитых на шунгитсодержащих породах, слабая подвижность органоминеральных комплексов ведет к формированию в этих почвах текстурно недифференцированного профиля, где процессы трансформации органического вещества и минеральной массы протекают на месте без миграции веществ за пределы почвенной толщи.

Вместе с тем не все геохимические особенности почв Заонежья, включая оценку соотношений содержания химических элементов в почвах и горных породах, выяснены до конца. В связи с этим целью настоящей работы является сравнение элементных составов почв и горных пород изучаемого района, определение черт сходства и различия в накоплении элементов в почвенных горизонтах, в том числе гумусовом, дерновом и лесной подстилке.

## Материалы и методы

В качестве материала для исследования использовали пробы, отобранные из верхней части заложенных нами профилей почв, сформированных на шунгитовых сланцах и шунгитовой морене (рис. 1). Работы по отбору образцов проводили в 2001 г. в рамках комплексного изучения территории Заонежского полуострова совместно с сотрудниками лаборатории лесного почвоведения Института леса Карельского научного центра РАН под руководством Н. Г. Федорец. Пробоподготовка и часть почвенных анализов выполнены сотрудниками лаборатории лесного почвоведения ИЛ КарНЦ РАН.

Сравнивали элементные составы горизонтов почв лесных (буроземы темные) и луговых (дерновые) ландшафтов. Для первых характерно наличие лесной подстилки, для вторых – присутствие верхнего дернового горизонта. Материал верхних и нижележащего гумусово-аккумулятивного горизонтов анализировали методом ICP-MS. Для расчетов и графических построений использовали анализы 32 проб из 16 почвенных профилей. В выборки не включали данные по перегнойно-глеевым почвам, залегающим в понижениях рельефа. В некоторых из этих почв установлено относительно низкое содержание Bi, Na, K, Al, Ti, Li, Be, Ga, Zr, Nb, Ag, V, Ba, Sr, Sc, в других при определяющей роли Fe, присутствующего в количестве до 10,5 мас. %, резко повышено содержание Mn, Cd, Zn, Co, Bi, повышено – Ag, V, Cu, Mo.

Для графического представления полученных результатов строили геохимические спектры горных пород и почв. Нормирование проводили по кларкам элементов в земной коре и фоновому содержанию химических элементов в наиболее распространенных в районе породах заонежской свиты (см. табл. 1). Для этого рассчитывали кларки концентрации (КК) как отношение среднего геометрического содержания элементов в почвах и породах к их кларкам в земной коре и коэффициенты ККп как отношение содержания элементов в почвах к их содержанию в породах. Поскольку для оценки фоновых характеристик пород использованы средние геометрические значения [Томила и др., 2004], такие же значения рассчитывали и применяли в ходе сопоставлений и для почв. Единичные определения некоторых элементов оказались ниже пределов обнаружения примененным для анализа методом. Поэтому при расчете средних в выборки включали значения, равные половине этих пределов. Из расчета исключили значения очень низкого содержания Си в пробах почвы одного из профилей бурозема оподзоленного, в том числе «трех-сигмовое» в гумусовом горизонте (0,2 мг/кг) и пониженное – в дерновом (3 мг/кг). Гипотезы о значимости различий дисперсий и средних нормально распределенных значений проверялась по критериям Фишера (F) и Стьюдента (t) соответственно.

Расчеты и графические построения проводили с использованием пакета «Анализ данных» программного продукта Microsoft Excel.

## Результаты и обсуждение

Полученные ранее данные (см. табл. 1) позволили разделить химические элементы в по-

родах сланцево-карбонатно-шунгит-туфового подкомплекса (заонежская свита) по среднему геометрическому значению кларков концентрации на *три группы* (рис. 2): As, Mo, Y, Li, Sc (КК > 10); Be, V, Ba, Cu, Zn, Cr, Ni, Sr, Co, Mn, Ag (10 > КК ≥ 1); Pb, Ti, Ga, U, Fe, K, Zr, Al, Na, Mg, Th, Ca, Nb, Bi (КК < 1). Для долеритов (см. выше) выделяется *две группы*: Cu, Fe, V, Ti, Co, Ca, Mn, Y, Zn, Mg (6 > КК > 1) и Zr, Al, Na, Ni, Nb, Cr, Sr, K, Ba, Pb, Th, U (КК < 1).

В табл. 2 приведено содержание 30 элементов в почвах исследованной территории Заонежского полуострова. На основе представленных в таблице данных построены геохимические спектры почвенных горизонтов (см. рис. 2 и 3).

Сравнение геохимических спектров показало снижение значений коэффициента аппроксимации в ряду осадочные горные породы → подподстилочный горизонт → лесная подстилка. Данные изменения контролируются общим сближением (выравниванием) значений кларков концентрации элементов в почвах относительно пород. В свою очередь, это связано с различиями в миграционной способности химических элементов в процессах почвообразования, в том числе при разрушении и преобразовании коренных углеродсодержащих пород, изначально удерживающих многие токсиканты за счет сорбции или в кристаллической решетке минералов. Среди последних, в частности, установлены пирит, пирротин, арсенопирит и другие сульфиды [Голубев, Новиков, 2005; Онежская..., 2011].

Влияние на элементный состав почв также могут оказывать долериты, распространенные в районе, в том числе в составе обломков в самих почвах. В среднем в долеритах больше, чем в осадочных породах, содержится (в число раз): Ca (17), Mg (5,1), Nb (4,6), Fe (4,3), Ti (3,5), Zr (2,3), Al (2,1), Cu (2,0), Mn (1,8), Na (1,6), Co (1,5), меньше присутствует (в число раз): Ba (20), Cr (6,9), Y (6,2), Sr (6,1), U (5,5), Pb (5,3), Ni (4,5), Zn (1,7), V (1,6), Th (1,5), K (1,5) (см. табл. 1). В случае близкого расположения коренных карбонатных пород, а также их обломков, почвы обогащаются Ca и Mg, меняют свои кислотно-основные свойства. В то же время Mg в самих почвах в большей степени коррелирует с Fe, а не с Ca, что связано с распределением элементов между органической и минеральной частями почвенных горизонтов разных по типу почв [Рыбаков, 2004].

Среднее геометрическое содержание в почвах с лесной подстилкой, значительно превышающее кларк, отмечено только для As (КК = 6,1 – подподстилочный горизонт и 4,2 –

Таблица 2. Содержание химических элементов в почвах Заонежья, мг/кг

Table 2. Content of chemical elements in soils of the Zaonezhye region, mg/kg

Горизонты почв Soil horizons	Статистические показатели Statistical indicators	As	Mo	Y	Li	Sc	Be	V	Ba	Cu	Zn
Почвы с горизонтом лесной подстилки Soils with the forest floor horizon											
A0	$x_{cp}$	7,22	0,303	2,96	3,50	2,13	0,191	20,5	194	10,5	70,6
	$\varepsilon$	2,00	1,64	1,79	2,03	1,75	1,69	1,57	1,47	2,22	2,16
A1 (A1A2)	$x_{cp}$	10,4	0,462	7,86	11,2	6,29	0,596	55,8	303	12,7	40,9
	$\varepsilon$	1,55	2,56	1,45	1,82	1,42	1,17	1,72	1,27	4,57	2,93
Почвы без лесной подстилки Soils without the forest floor											
Ad	$x_{cp}$	11,7	0,895	9,55	15,3	7,43	0,604	71,9	300,0	40,0*	75,4
	$\varepsilon$	1,60	2,94	1,55	1,620	1,55	1,16	1,92	1,23	2,08*	2,71
A1	$x_{cp}$	13,2	0,816	10,5	16,7	8,17	0,709	80,2	314,1	46,2*	66,3
	$\varepsilon$	1,50	3,46	1,52	1,50	1,54	1,16	1,81	1,28	2,03*	3,23
		Cr	Ni	Sr	Co	Mn	Ag	Pb	Ti	Ga	U
Почвы с горизонтом лесной подстилки Soils with the forest floor horizon											
A0	$x_{cp}$	30,7	11,8	52,7	3,90	933	0,086	11,4	668	1,66	0,241
	$\varepsilon$	1,55	1,59	1,56	1,57	1,98	7,89	1,62	1,81	1,69	1,69
A1 (A1A2)	$x_{cp}$	48,3	19,7	126	7,43	326	0,040	8,86	2114	5,34	0,588
	$\varepsilon$	1,42	1,96	1,40	1,93	1,76	5,31	1,30	1,39	1,22	1,50
Почвы без лесной подстилки Soils without the forest floor											
Ad	$x_{cp}$	66,1	24,3	101,7	9,5	575	0,136	12,0	2369	4,97	0,719
	$\varepsilon$	1,29	1,96	1,62	1,73	1,61	4,85	1,68	1,52	1,19	1,52
A1	$x_{cp}$	61,5	28,5	109,6	10,9	543	0,146	10,6	2637	5,43	0,768
	$\varepsilon$	1,30	2,00	1,53	1,93	1,61	5,79	1,46	1,48	1,14	1,57
		Fe	K	Zr	Al	Na	Mg	Th	Ca	Nb	Bi
Почвы с горизонтом лесной подстилки Soils with the forest floor horizon											
A0	$x_{cp}$	5817	3230	13,4	9169	3568	2381	0,849	8017	1,49	0,051
	$\varepsilon$	1,70	1,58	2,04	1,83	1,99	1,55	2,14	1,47	1,73	3,08
A1 (A1A2)	$x_{cp}$	15976	9344	43,6	33532	14060	4959	2,29	7800	4,45	0,027
	$\varepsilon$	1,57	1,30	1,45	1,25	1,48	1,85	1,43	1,27	1,41	3,06
Почвы без лесной подстилки Soils without the forest floor											
Ad	$x_{cp}$	20474	10655	45,9	34154	12565	6993	2,11	9224	5,53	0,030
	$\varepsilon$	1,46	1,24	1,28	1,16	1,44	1,68	1,32	1,43	1,40	2,84
A1	$x_{cp}$	22910	11248	47,2	37850	14231	7596	3,29	9805	5,85	0,029
	$\varepsilon$	1,49	1,27	1,29	1,14	1,41	1,60	2,14	1,35	1,43	2,87

Примечание.  $x_{cp}$  – среднее геометрическое значение,  $\varepsilon$  – стандартный множитель; A0 – лесная подстилка (n = 9), A1 (A1A2) – подподстильный гумусовый горизонт, реже горизонт с признаками оподзоленности (n = 9), Ad – дерновый горизонт (n = 7, \*n = 6), A1 – гумусовый горизонт (n = 7, \*n = 6).

Note.  $x_{cp}$  – geometrical mean,  $\varepsilon$  – standard multiplier; A0 – forest floor (n = 9), A1 (A1A2) – humus horizon under the forest floor, less often a horizon with signs of podzol (n = 9), Ad – sod horizon (n = 7, \*n = 6), A1 – humus horizon (n = 7, \*n = 6).

лесная подстилка при фоновом значении в породах 96,5). В части проб выявлено накопление в лесной подстилке Ag, в результате чего кларк концентрации на рис. 2 немного превысил единицу (КК = 1,2), а в отдельных случаях достигал очень высоких значений (до 15,2–19,5). Сле-

дует отметить, что содержание Ag в шунгитах (полиметаллическая рудная формация с Pb, Zn, Ag и т. д.) может достигать 150 г/т [Кушнеренко и др., 2001].

Как показано ранее [Рыбаков, 2004, 2017], в почвах Заонежья содержание As тем меньше,

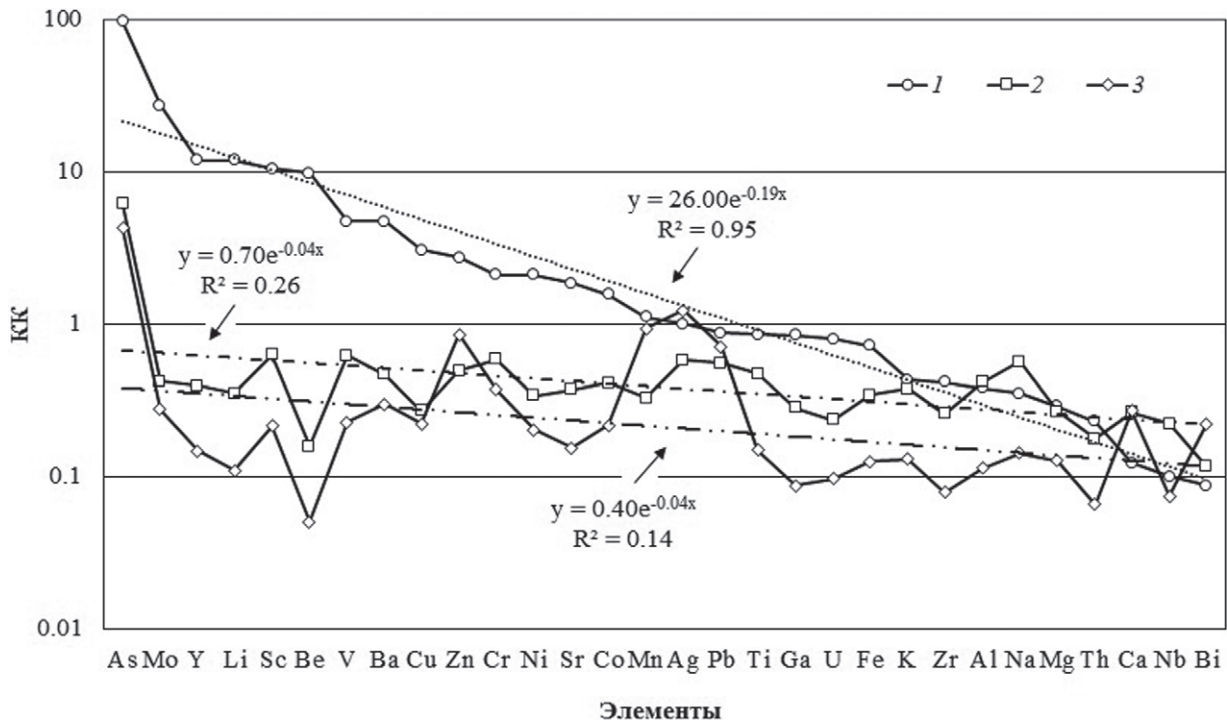


Рис. 2. Геохимические спектры почв с горизонтом лесной подстилки:

1 – породы заонежской свиты (см. табл. 1); 2 – подподстилочный горизонт почв; 3 – лесная подстилка (см. табл. 2). КК – кларки концентрации элементов.  $R^2$  – коэффициенты аппроксимации экспоненциальных моделей

Fig. 2. Geochemical spectra of soils with the forest floor horizon:

1 – rocks of the Zaonega Formation (see Table 1); 2 – horizon under the forest floor; 3 – forest floor (see Table 2). КК – clarkes of element's concentration.  $R^2$  – coefficients of approximation of exponential models

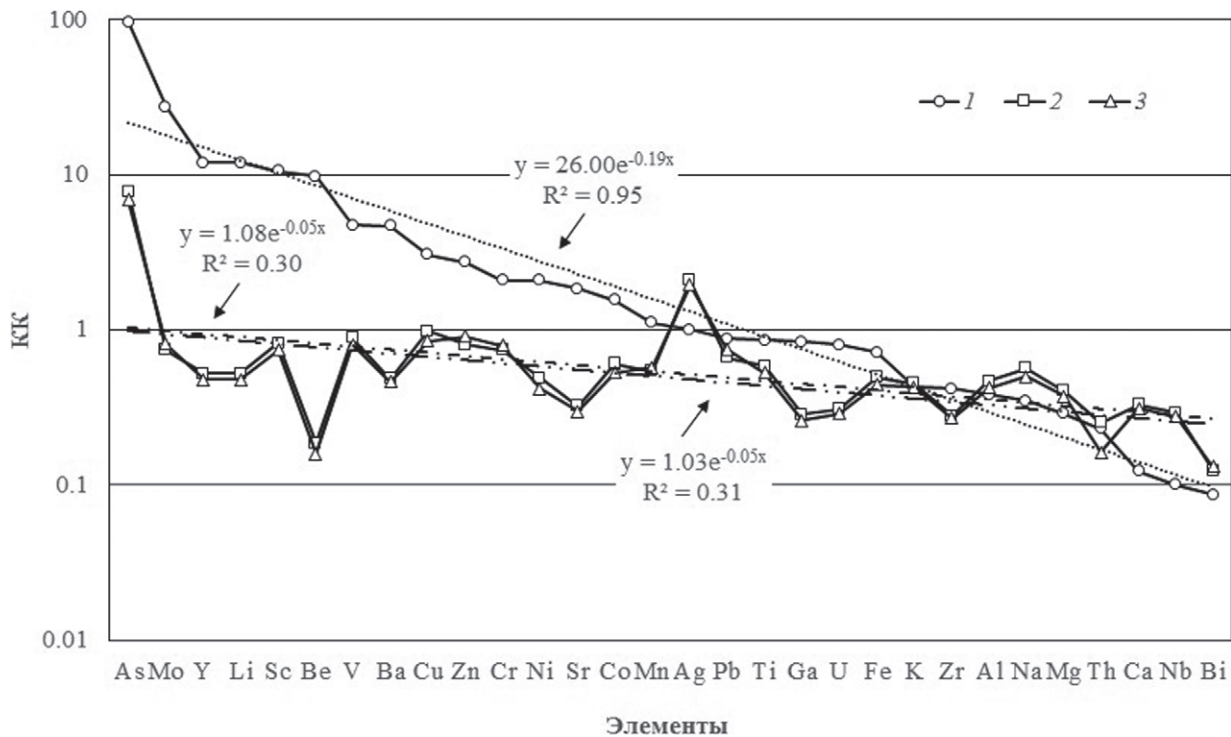


Рис. 3. Геохимические спектры почв без горизонта лесной подстилки:

1 – породы заонежской свиты (см. табл. 1); 2 – гумусовый горизонт почв; 3 – дерновый горизонт (см. табл. 2)

Fig. 3. Geochemical spectra of soils without the forest floor horizon:

1 – rocks of the Zaonega Formation (see Table 1); 2 – humus soil horizon; 3 – sod horizon (see Table 2)

чем в них выше содержание Са и ниже почвенная кислотность, что характерно для геохимических ландшафтов Н-Са класса. В целом количество As слабо зависит от соотношения органического и минерального вещества в генетических горизонтах почв. Для горизонтов, расположенных ближе к почвообразующим породам, концентрация As обусловлена составом заимствованного минерального вещества в большей степени, чем для вышележащих.

Ранжированный ряд отношений фонового содержания химических элементов в осадках заонежской свиты к среднегеометрическому содержанию в подподстилочном горизонте почв выглядит следующим образом (в число раз): Mo (65), Be (62), Li (34), Y (30), Sc (17), As (16), Cu (11), Ba (10), V (7,6), Ni (6,1), Zn (5,5), Sr (5,0), Co (3,8), Cr (3,6), Mn (3,4) и т. д. Таким образом, снижение данного отношения в наибольшей степени проявляется для элементов, определяющих специализацию пород заонежской свиты (см. рис. 2). Напротив, такие элементы, как Nb, Ca, Na, Bi, Al, способны накапливаться в минеральных горизонтах почв. Отметим, что выявленная дифференциация соответствует различию элементных составов осадочных и магматических (долериты) пород, показанному выше при анализе данных табл. 1.

Меньшее содержание многих химических элементов в лесной подстилке по сравнению с нижележащим почвенным горизонтом установлено для (в число раз): Na (3,9), Al (3,7), Zr (3,3), Ga (3,2), Li (3,2), Ti (3,2), Be (3,1), Nb (3,0), Sc (2,9), K (2,9), Fe (2,7), V (2,7), Th (2,7), Y (2,7), U (2,4), Sr (2,4), Mg (2,1) (различия выборочных средних по t-тесту Стьюдента значимы с уровнями значимости от  $p < 0,001$  до  $p = 0,005$ ) и т. д.

Активно поглощается растительностью и, как правило, накапливается в лесной подстилке необходимый для роста и развития Mn (различия значимы при  $p = 0,001$ ). Согласно данным по медианному содержанию Mn [Рыбаков, 2017], в минеральных горизонтах почв Заонежья этот микроэлемент присутствует в более высоких концентрациях, чем в среднем по Карелии [Федорец и др., 2008; Тяжелые..., 2015] – 486 и 200 мг/кг соответственно. Аналогичное соотношение установлено для горизонта лесной подстилки – 907 и 475 мг/кг. При этом в лесных подстилках перегнойно-глеевых почв содержание Mn может быть пониженным до 120 мг/кг, а в дерновом горизонте, напротив, повышенным до 2260 мг/кг.

Различия незначимы для (p): Ca (0,429), Cu (0,372), Ag (0,203), Mo (0,127), Bi (0,121), Zn (0,116), As (0,100) и Pb (0,096). Присутст-

вующий в данной группе Pb считается металлом с низкой биологической доступностью и в большей степени накапливается в тканях корней [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989]. Поэтому, возможно, в некоторых случаях его слабая концентрация в лесной подстилке обусловлена определенным (незначительным) атмосферным загрязнением территории.

Более значительная аккумуляция Pb, так же как и других элементов (см. выше), может быть связана с эпигенетически преобразованными породами докембрийских формаций. Однако наличие зон естественного влияния последних на почвенный покров Заонежья, по нашему мнению, требует дальнейшего изучения и подтверждения. Так, достаточно глубокое (55–310 м) залегание рудных тел и слой моренных отложений [Голубев, Новиков, 2005], по всей вероятности, обеспечивают низкие концентрации элементов в торфяной залежи расположенного над ними низинного болота [Максимов, 2005]. В случае антропогенного вмешательства в геологическую среду нагрузка элементами-токсикантами, в том числе Pb, на природную среду, по сравнению с локальным геохимическим фоном, многократно возрастает [Рыбаков, 2002а, б, 2005б].

В почвах без лесной подстилки гумусовый и дерновый горизонты близки по своему элементному составу (рис. 3). Уровни значимости средних значений логарифмов содержания элементов (p) варьируют от 0,092–0,096 (Th, Al) до 0,413–0,468 (Mn, Zn, Zr, Bi, Ag). Различие отмечено только для Be ( $p = 0,033$ ). Среднее геометрическое содержание элементов превысило кларки для As (КК = 7,8 – минеральный и 6,9 – дерновый горизонты) и Ag (КК = 2,1 и 1,9 соответственно). В этих почвах содержание элементов ниже, чем в породах (дерновый – гумусовый горизонты, в число раз): Be (52–61), Mo (37–34), Li (23–25), Y (23–25), Sc (13–14), As (12–14), Ba (10–10), Sr (5,7–6,2), V (5,3–5,9), Ni (4,3–5,0), Cu (3,1–3,6), Zn (3,4–3,0), Ga (2,9–3,2), Cr (2,8–2,6), Co (2,6–2,9), U (2,6–289), Mn (2,0–1,9), Fe (1,46–1,63), Ti (1,46–1,6) и т. д. Как в дерновом, так и в гумусовом горизонтах часто относительно условного фона накапливаются Nb, Ca, Ag, Bi, Na, Mg, Al (см. рис. 3).

В целом содержание элементов в минеральном горизонте почв под лесной подстилкой ниже, чем в таковом под дерновым почвенным горизонтом (в число раз): Cu (3,6), Ag (3,6), Mo (1,8), Mn (1,7), Zn (1,6), Mg (1,5), Li (1,5), Co (1,5), Ni (1,4), V (1,4), Fe (1,4) и т. д. (рис. 4). Однако статистически значимые различия выявлены только для Be ( $p = 0,022$ ), Cu ( $p = 0,023$ )

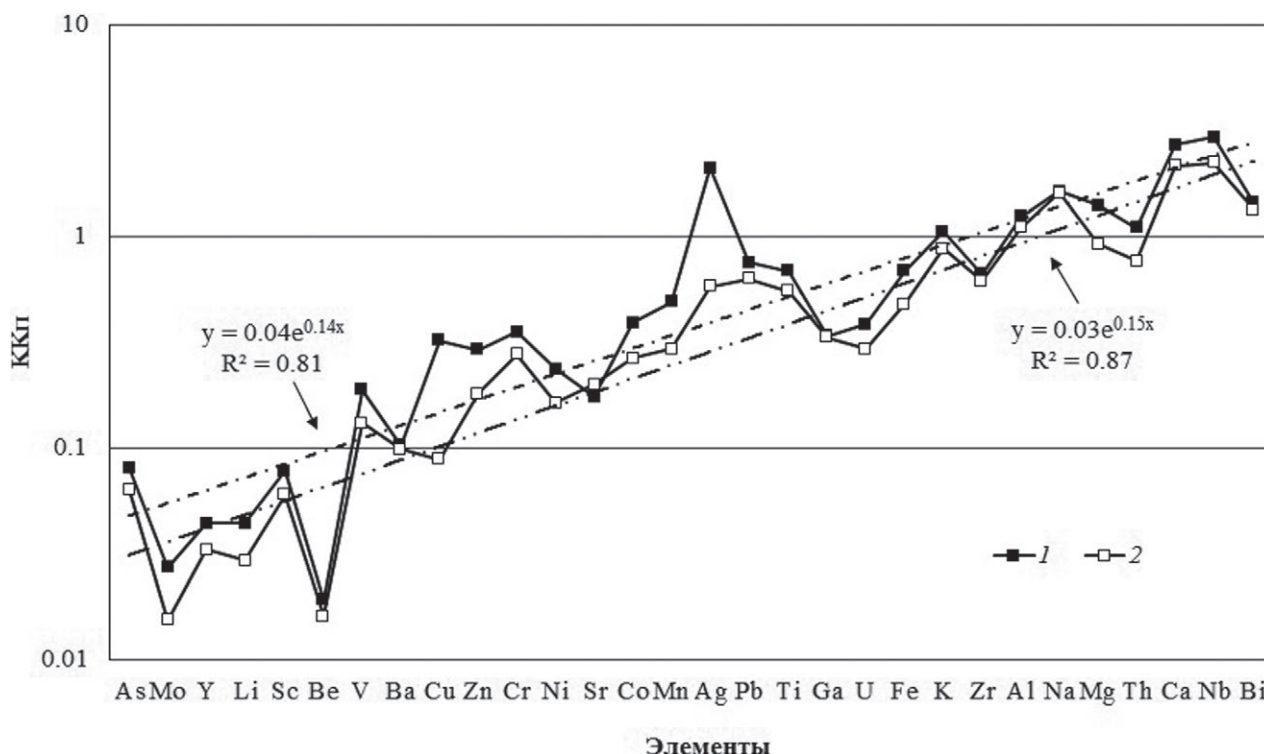


Рис. 4. Геохимические спектры горизонтов почв (см. табл. 2):

1 – под дерновым горизонтом без лесной подстилки; 2 – под лесной подстилкой. ККп – см. в разделе «Материалы и методы»

Fig. 4. Geochemical spectra of soil horizons (see Table 2):

1 – under the sod horizon without the forest floor; 2 – under the forest floor. ККп – see the Materials and Methods section

и Mn ( $p = 0,038$ ). Для Ag  $p = 0,079$ . Содержание Sr в среднем выше в почвах с лесной подстилкой, тем не менее данные различия статистически незначимы ( $p = 0,243$ ). Нет различия в содержании Na ( $p = 0,475$ ), Bi ( $p = 0,450$ ), Ga ( $p = 0,434$ ), Ba ( $p = 0,382$ ), Zr ( $p = 0,250$ ), Zn ( $p = 0,203$ ), Mo ( $p = 0,156$ ), Ni ( $p = 0,152$ ), Pb ( $p = 0,145$ ), As ( $p = 0,145$ ) и т. д.

Таким образом, результаты проведенного ранее нами и другими авторами изучения почвенного покрова Заонежья в настоящем исследовании дополнены геохимическими спектрами и ранжированными геохимическими рядами в сочетании с проверкой гипотезы о значимости различий средних значений логарифмов содержания элементов. Это позволило провести сравнение элементного состава почв, на формирование которых оказали влияние шунгитовые, основные и карбонатные породы, распространенные в данном районе как в лесных, так и в луговых ландшафтах.

## Выводы

Результаты исследования приводят к следующим основным выводам:

1. В отличие от специализированных на As, Mo, Y, Li, Sc, Be, V, Ba, Cu, Zn, Cr, Ni, Sr, Co и другие элементы пород заонежской свиты, все без исключения изученные почвы выше кларкового значения содержат только потенциально опасный для биоты As. Содержание Ag, реже Zn, Cu, V и Mo также может превышать кларки (в основном в неоподзоленных дерновых почвах луговых ландшафтов).
2. Показанное на геохимических спектрах почв сближение численных значений кларков концентрации тридцати химических элементов обусловлено различиями в миграционной способности элементов, которая зависит от состава почвообразующих пород и условий почвообразования. Так, многие токсики удерживаются в коренных углеродсодержащих породах за счет сорбции или в кристаллической решетке минералов и ограничено наследуются четвертичными отложениями и почвами. Аккумуляция или рассеяние химических элементов также определяются свойствами почв, зависят от влияния основных и карбонатных пород, находящихся в локализациях среди осадочных образований и в виде обломков в самих почвах.



3. Более высокую степень загрязнения почв можно ожидать в зонах влияния на почвенный покров эпигенетически измененных докембрийских образований, при этом наличие таких зон зависит от геологического строения месторождений и рудопроявлений.
4. Биогенное накопление в почвах лесных ландшафтов в наибольшей степени характерно для Mn, в меньшей – для Ca, Ag, Mo, Bi и Zn, что отражается в повышенном содержании этих элементов в лесной подстилке. В целом небольшое и неопасное для биоты повышение содержания Pb в насыщенных органикой горизонтах изученных почв, предположительно, связано с «фоновым» атмосферным загрязнением изученной территории.
5. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшей геоэкологической оценке исследуемого района, а также учтены при геохимических поисках месторождений по вторичным ореолам рассеяния.

*Автор благодарен д. б. н., чл.-корр. РАН О. Н. Бахмет, д. г.-м. н. А. И. Слабунову и к. г.-м. н. А. В. Степановой за полезные советы и рекомендации при подготовке настоящей статьи.*

*Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН).*

## Литература

*Бахмет О. Н., Федорец Н. Г.* Почвенный покров // Сельговые ландшафты Заонежского полуострова: природные особенности, история освоения и сохранение / Под ред. А. Н. Громцева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 47–50.

*Виноградов А. П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.

*Голубев А. И., Новиков Ю. Н.* Геологическое строение и уран-ванадиевые месторождения Заонежья // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма / Отв. ред. Е. П. Иешко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 4–13.

*Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

*Касимов Н. С., Власов Д. В.* Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2015. № 2. С. 7–17. URL: <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/109> (дата обращения: 25.02.2019).

*Классификация и диагностика почв России.* Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с.

*Куликов В. С., Светов С. А., Слабунов А. И., Куликова В. В., Полин А. К., Голубев А. И., Горьковец В. Я., Иващенко В. И., Гоголев М. А.* Геологиче-

ская карта Юго-Восточной Фенноскандии масштаба 1:750 000: Новые подходы к составлению // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 2. С. 3–41. doi: 10.17076/geo44

*Кушнеренко В. К., Солдатенко В. Е., Колюин В. А.* Оценка радиоэкологического состояния Онежского рудного района. Объяснительная записка к карте масштаба 1:200 000, листы Р-36-XVII (57, 58) и Р-36-XVIII (59, 60). Отчет Регионального геоэкологического центра филиала ГП «Невскгеология». СПб., 2001. 87 с.

*Максимов А. И.* Содержание макро- и микроэлементов в торфяных залежах болотных экосистем вблизи месторождения Падма // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма / Ред. Е. П. Иешко и др. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 72–81.

*Морозова Р. М.* Лесные почвы Карелии. Л.: Наука, 1991. 184 с.

*Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерализация) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов.* Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.

*Перельман А. И.* Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.

*Рыбаков Д. С.* Автономные геохимические ландшафты района распространения шунгитовых пород (Заонежье, Республика Карелия) // Геология, геохимия и экология Северо-Запада России: Матер. I Междунар. науч. конф. Тез. докл. СПб., 2005а. С. 143–146.

*Рыбаков Д. С.* Геоэкология Карелии: геохимический подход к проблемам оценки риска. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. 313 с.

*Рыбаков Д. С.* Соотношение мышьяка и макроэлементов в почвах Заонежья // Биокосные взаимодействия: жизнь и камень: Матер. II Междунар. симп. СПб., 2004. С. 251–254.

*Рыбаков Д. С.* Средняя Падма: эколого-геологический аспект // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 5. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2002а. С. 92–96.

*Рыбаков Д. С.* Характеристика распространения химических элементов в верхнем слое почв Заонежья (Республика Карелия) // Сергеевские чтения. Вып. 4. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (Москва, 21–22 марта 2002 г.). М.: ГЕОС, 2002б. С. 335–339.

*Рыбаков Д. С.* Эколого-геохимическое картирование Заонежья и прогнозная оценка техногенного загрязнения локальных экосистем // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма / Отв. ред. Е. П. Иешко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005б. С. 82–88.

*Степанова А. В., Самсонов А. В., Ларионов А. Н.* Заключительный эпизод магматизма среднего палеопротерозоя в Онежской структуре: данные по долерам Заонежья // Труды КарНЦ РАН. 2014. № 1. С. 3–16. URL: [http://resources.krc.karelia.ru/transactions/doc/trudy2014/trudy\\_2014\\_1\\_003-16.pdf](http://resources.krc.karelia.ru/transactions/doc/trudy2014/trudy_2014_1_003-16.pdf) (дата обращения: 25.02.2019).

*Тойка М. А., Перевозчикова Е. М., Левкина Т. И., Заварзин В. М., Михкиев А. И., Изергина М. М.* Микроэлементы в Карелии. Л.: Наука, 1973. 284 с.

Томилина О. В., Паламарчук С. Ф., Яхнин Э. Я., Егоров А. И. Комплект карт геохимической основы государственной геологической карты Российской Федерации // Геохимическое картирование севера европейской территории России в рамках международной программы «Экогеохимия Баренцева региона» и проведение опережающего этапа составления геохимических основ Госгеолкарты-1000 третьего поколения на листы Р-35,36. Т. 2: Отчет о научно-исследовательской работе / Отв. исп. В. А. Чекушин. СПб., 2004. 146 с.

Тяжелые металлы в почвах Карелии / Отв. ред. Г. В. Ахметова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 222 с.

## References

Bakhmet O. N., Fedorets N. G. Pochvennyi pokrov [Soil cover]. *Sel'govye landshafty Zaonezhskogo poluostrova: prirod. osobennosti, istoriya osvoeniya i sokhranenie* [Selka landscapes of the Zaonezhsky Peninsula: natural characteristics, history of development, and conservation]. Ed. A. N. Gromtsev. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. P. 47–50.

Fedorets N. G., Bakhmet O. N., Solodovnikov A. N., Morozov A. K. Pochvy Karelii: geokhimicheskii atlas [Soils of Karelia: A geochemical atlas]. Moscow: Nauka, 2008. 47 p.

Fedorets N. G., Morozova R. M., Bakhmet O. N., Tkachenko Yu. N. Pochvy i pochvennyi pokrov Zaonezh'ya [Soils and soil cover in Zaonezhye]. *Ekol. probl. osvoeniya mestorozhdeniya Srednyaya Padma* [Ecol. probl. of the Srednyaya Padma deposit development]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. P. 20–34.

Golubev A. I., Novikov Yu. N. Geologicheskoe stroenie i uran-vanadievye mestorozhdeniya Zaonezh'ya [Geological structure and uranium-vanadium deposits of Zaonezhye]. *Ekol. probl. osvoeniya mestorozhdeniya Srednyaya Padma* [Ecol. probl. of the Srednyaya Padma deposit development]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. P. 4–13.

Kabata-Pendias A., Pendias Kh. Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh [Microelements in soils and plants]. Moscow: Mir, 1989. 439 p.

Kasimov N. S., Vlasov D. V. Klarki khimicheskikh elementov kak etalony sravneniya v ekogeokhimii [Clarkes of chemical elements as comparison standards in eco-geochemistry]. *Vestnik Mosk. univ. Ser. 5. Geogr.* [Moscow Univ. Bull. Ser. 5. Geogr.]. 2015. No. 2. P. 7–17. URL: <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/109> (accessed: 25.02.2019).

Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and Diagnostics of Soils of Russia]. Smolensk: Oikumena, 2004. 343 p.

Kulikov V. S., Svetov S. A., Slabunov A. I., Kulikova V. V., Polin A. K., Golubev A. I., Gor'kovets V. Ya., Ivashchenko V. I., Gogolev M. A. Geologicheskaya karta Yugo-Vostochnoi Fennoskandii masshtaba 1:750000: Novye podkhody k sostavleniyu [Geological map of Southeastern Fennoscandia (scale 1:750000): a new approach to map compilation]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2017. No. 2. P. 3–41. doi: 10.17076/geo444

Федорец Н. Г., Бахмет О. Н., Солодовников А. Н., Морозов А. К. Почвы Карелии: геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 47 с.

Федорец Н. Г., Морозова Р. М., Бахмет О. Н., Ткаченко Ю. Н. Почвы и почвенный покров Заонежья // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма / Отв. ред. Е. П. Иешко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 20–34.

Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // *Chem. Geol.* 2008. Vol. 253, iss. 3–4. P. 205–221. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.05.010

Поступила в редакцию 03.07.2020

Kushnerenko V. K., Soldatenko V. E., Kolyuin V. A. Otsenka radioekologicheskogo sostoyaniya Onezhskogo rudnogo raiona. Ob'yasnitel'naya zapiska k karte masshtaba 1:200000, listy P-36-XVII (57, 58) i P-36-XVIII (59, 60). Otchet Regional'nogo geoeologicheskogo tsentra filiala GP "Nevskgeologiya" [Assessment of the radioecological state of the Onega ore district. The explanatory note to the map scale 1:200.000, sheets P-36-XVII (57, 58) and P-36-XVIII (59, 60). A report of the Regional Geoecological Center of the Branch of the Nevskgeologiya State Enterprise]. St. Petersburg, 2001. 87 p.

Maksimov A. I. Soderzhanie makro- i mikroelementov v torfyanikh zalezakh bolotnykh ekosistem vblizi mestorozhdeniya Padma [Content of macro- and microelements in peat deposits of mire ecosystems near Padma occurrence]. *Ekologicheskie problemy osvoeniya mestorozhdeniya Srednyaya Padma* [Ecological problems of the Srednyaya Padma deposit development]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. P. 72–81.

Morozova R. M. Lesnye pochvy Karelii [Forest Soils of Karelia]. Leningrad: Nauka, 1991. 184 p.

Onezhskaya paleoproterozoiskaya struktura (geologiya, tektonika, glubinnoe stroenie i minerageniya) [Onega Paleoproterozoic structure (geology, tectonics, deep structure, and minerageny)]. Eds. Glushanin L. V., Sharov N. V., Shchiptsov V. V. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2011. 431 p.

Perel'man A. I. Geokhimiya [Geochemistry]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 528 p.

Rybakov D. S. Avtonomnye geokhimicheskie landshafty raiona rasprostraneniya shungitovykh porod (Zaonezh'e, Respublika Kareliya) [Autonomous geochemical landscapes of the area of distribution of shungite rocks (Zaonezhye, Republic of Karelia)]. *Geologiya, geokhimiya i ekologiya Severo-Zapada Rossii: Materialy I Mezhdunar. nauch. konf. Tez. dokl.* [Geology, geochemistry and ecology of the North-West of Russia. Materials of the I International scientific conference. Tez. docl.]. St. Petersburg, 2005a. P. 143–146.

Rybakov D. S. Geoekologiya Karelii: geokhimicheskii podkhod k problemam otsenki riska [Geoecology of Karelia: a geochemical approach to the problems of risk assessment]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2017. 313 p.

Rybakov D. S. Sootnoshenie mysh'yaka i makroelementov v pochvakh Zaonezh'ya [The relation between

arsenic and macroelements in soils of Zaonezhie]. *Bio-kosnyye vzaimodeistviya: zhizn' i kamen'.* *Mat. II Mezhdunar. simp.* [Bioinert interactions: life and stone: Proceed. II int. symp.]. St. Petersburg, 2004. P. 251–254.

Rybakov D. S. Srednyaya Padma: ekologo-geologicheskii aspekt [Srednyaya Padma: ecological-geological aspect]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* [Geology and useful minerals of Karelia]. Iss. 5. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2002a. P. 92–96.

Rybakov D. S. Kharakteristika rasprostraneniya khimicheskikh elementov v verkhnem sloe pochv Zaonezh'ya (Respublika Kareliya) [Characteristics of the distribution of chemical elements in the upper layer of soils in Zaonezh'ye (Republic of Karelia)]. *Sergeevskie chteniya. Vyp. 4. Mat. godichnoi sessii Nauch. soveta RAN po probl. geokol., inzhenernoi geol. i gidrogeol. (Moskva, 21–22 Marta 2002 g.)* [Sergeev's readings. Proceed. of the annual session of the Sci. Council of the RAS on the probl. of geocol., engineering geol. and hydrogeol. Iss. 4 (Moscow, March 21–22, 2002)]. Moscow: GEOS, 2002b. P. 335–339.

Rybakov D. S. Ekologo-geokhimicheskoe kartirovanie Zaonezh'ya i prognoznaya otsenka tekhnogenogo zagryazneniya lokal'nykh ekosistem [Ecological and geochemical mapping of the Zaonezh'ye region and predictive assessment of anthropogenic pollution of local ecosystems]. *Ekol. probl. osvoeniya mestorozhdeniya Srednyaya Padma* [Ecol. probl. of the Srednyaya Padma deposit development]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005b. P. 82–88.

Stepanova A. V., Samsonov A. V., Larionov A. N. Zaklyuchitel'nyi epizod magmatizma srednego paleoproterozoya v Onezhskoi strukture: dannye po doleritam Zaonezh'ya [The final episode of the middle Proterozoic magmatism in the Onega structure: data on Trans-Onega dolerites]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2014.

No. 1. P. 3–16. URL: [http://resources.krc.karelia.ru/transactions/doc/trudy2014/trudy\\_2014\\_1\\_003-16.pdf](http://resources.krc.karelia.ru/transactions/doc/trudy2014/trudy_2014_1_003-16.pdf) (accessed: 25.02.2019).

Toikka M. A., Perevozchikova E. M., Levkina T. I., Zavarzin V. M., Mikhkiev A. I., Izergina M. M. Mikroelementy v Karelii [Microelements in Karelia]. Leningrad: Nauka, 1973. 284 p.

Tomilina O. V., Palamarchuk S. F., Yakhnin E. Ya., Egorov A. I. Geokhimicheskoe kartirovanie severa evropeiskoi territorii Rossii v ramkakh mezhdunarodnoi programmy "Ekogeokhimiya Barentseva regiona" i provedenie operezhayushchego etapa sostavleniya geokhimicheskikh osnov Gosgeol'karty-1000 tret'ego pokoleniya na listy P-35,36 [Geochemical mapping of the North of the European territory of Russia within the framework of the international program *Ecogeochemistry of the Barents Region* and conducting the advanced stage of compiling the geochemical bases of the Gosgeol'karta-1000 (state geological map) of the third generation on sheets P-35,36]. Vol. 2: *Otchet o nauchno-issled. rabote* [Report on the research work]. St. Petersburg, 2004. 146 p.

Tyazhelye metally v pochvakh Karelii [Heavy metals in soils of Karelia]. Ed. G. V. Akhmetova. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. 222 p.

Vinogradov A. P. Srednee sodержanie khimicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh porod zemnoi kory [The average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust]. *Geokhim.* [Geochem. Int.]. 1962. No. 7. P. 555–571.

Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update. *Chem. Geol.* 2008. Vol. 253, iss. 3–4. P. 205–221. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.05.010

Received July 03, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

### **Рыбаков Дмитрий Сергеевич**

старший научный сотрудник лаб. геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии, к. г.-м. н. Институт геологии КарНЦ РАН, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН» ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910 эл. почта: rybakovd@krc.karelia.ru

## CONTRIBUTOR:

### **Rybakov, Dmitry**

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia e-mail: rybakovd@krc.karelia.ru

УДК 528.71/.72:551.243 + 553.52/.54 (470.22)

## **ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ОБНАЖЕНИЯ КАК СОВРЕМЕННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОСРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ ДОКЕМБРИЙСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЛАХДЕНПОХСКОГО РАЙОНА**

**В. А. Шеков, А. А. Иванов, С. А. Крылова**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

Поиски и выявление площадей, перспективных на добычу блочного камня, представляют собой многостадийную процедуру. Требования современного рынка строительных материалов к качественным и количественным свойствам блочного камня способствуют совершенствованию методов оценки природной трещиноватости территорий на разных масштабных уровнях еще на стадии проведения поисковых работ. В связи с этим в современных условиях для поиска новых объектов, соответствующих современным требованиям рынка, наиболее эффективными становятся статистические и горно-геометрические методы с последующей их обработкой. На протяжении коротких полевых сезонов 2018–2019 гг. вдоль трассы Приозерск – Сортавала в рамках изучения структурных неоднородностей и систем залегания трещин, представленных докембрийскими породами Лахденпохского людиковийско-калевийского метаморфического комплекса, на отдельных участках общей протяженностью более 20 км собрана цифровая коллекция обнажений. Участок вдоль трассы, где в ходе дорожно-строительных работ в дорожной выемке хорошо вскрыты коренные породы, является идеальным с точки зрения проведения фотограмметрической съемки. Для обработки материалов использовался подход, основанный на использовании технологии фотограмметрии для создания цифровых моделей обнажений (DOM – Digital Outcrop Model). Невысокие требования технологии фотограмметрии к оборудованию, его стоимости позволяют рассматривать этот метод описания обнажений как очень перспективный при проведении полевых геологических работ, позволяющий быстро и эффективно формировать цифровую модель местности практически любого разрешения. Важной особенностью подхода является повышение безопасности при работе на вертикальных и недоступных участках обнажений значительной высоты. Одновременно повышается информативность таких новаций, позволяющая многократно использовать полученную модель при камеральной работе для различных целей.

**Ключевые слова:** цифровая модель обнажения; трещина; фотограмметрия; структурная геология; геологическая формация; докембрий; Республика Карелия.

### **V. A. Shekov, A. A. Ivanov, S. A. Krylova. DIGITAL OUTCROP MODEL AS A MODERN METHOD OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT RESEARCH: THE EXAMPLE OF PRECAMBRIAN COMPLEXES IN LAHDENPOHSKY DISTRICT**

Prospecting and identification of areas promising for dimension stone quarrying is a multi-stage procedure. The qualitative and quantitative requirements of the modern building materials market to dimension stone contribute to the advancement of methods for assessing the natural fracturing of territories at different scales already in the prospecting

stage. In this regard, to search for new objects that meet modern market requirements, the most efficient are the statistical and mining-geometrical methods with subsequent processing of their results. During the short field seasons of 2018–2019, a digital collection of outcrops was compiled as part of a study of structural heterogeneities and fracture orientation systems in some areas represented by Precambrian rocks in the Lahdenpohsky Ludikovian-Kalevian metamorphic complex along the Priozersk-Sortavala road, totaling more than 20 km in length. The area along the road where bedrock was exposed by roadway excavation is ideal from the point of view of photogrammetric survey. The approach used for processing the material was based on photogrammetry technology application for creating digital outcrop models (DOM). The relatively low equipment requirements of the photogrammetry technology, and its cost allow considering this method of describing outcrops as very promising for geological fieldwork, permitting for a quick and efficient generation of a digital terrain model of almost any resolution. An important feature of this approach is that it makes the work on vertical and inaccessible sections of outcrops at considerable heights safer. At the same time, the information content of such innovations is increased, and the resulting model can be repeatedly used in office work for various purposes.

**Key words:** digital outcrop model; fracture; photogrammetry; structural geology; geological formation; Precambrian; Republic of Karelia.

## Введение

Методы получения цифровых объемных моделей земной поверхности известны уже много лет. За последние два десятилетия эти технологии вслед за развитием техники сканирования, увеличением мощности вычислительных средств и усложнением программного обеспечения значительно двинулись вперед. Сегодня эти технологии уже не считаются экзотикой и области их применения расширяются в геометрической прогрессии.

В настоящий момент ключевые позиции в области получения цифровых моделей на основе реальных объектов на поверхности земли принадлежат двум технологиям – лазерного сканирования и фотограмметрической съемки. Очень много публикаций, сравнивающих технические возможности обеих технологий, появилось в области градостроительства и геодезии [Murphy et al., 2013], археологии – для документирования архитектурных памятников [Cabrelles et al., 2010; Chiabrande et al., 2016], в том числе основанных на применении технологии BIM (Building Information Model), как, например, HBIM (Historic Building Information Model) [Murphy et al., 2011].

LIDAR (Light Detection And Ranging) технология. Работа с 3D цифровыми (виртуальными) геологическими обнажениями начала развиваться параллельно и основывалась на использовании методов лазерного дистанционного зондирования. Методы сканирования окружающей среды основываются на использовании приборов под общим названием LIDAR, лазерный луч в которых, сканируя

окружающий мир с разрешением до 1–5 мм (т. е. размер точки), в зависимости от дальности измерения, позволяет получать точечные облака сложных объемных объектов с объемами до десятков и сотен миллионов точек. Статическое расположение лидарных приборов на земле называется TLS (Terrestrial Laser Scan). Обработка облаков точек, полученных этим методом, позволяет создавать полигональные модели объектов, а при наложении на них текстур возможно получение фотореалистичных моделей объектов очень высокой точности.

TLS помещается перед обнажением в соответствии с его характерными параметрами. При необходимости оборудование перемещается для сканирования соседних областей, чтобы перекрыть поверхность обнажения. Выравнивание различных сканирований и позиционирование полученных цифровых объектов являются частью стадии постобработки. Вес оборудования TLS ограничивает его использование на коптерах при съемке вертикальных обнажений.

В настоящее время выделяют множество видов лазерных сканеров, которые делятся по принципу измерения расстояния, по мобильности [Фролов...]. Некоторые типы относятся к классу стационарных, то есть съемка окружающего мира производится со штативов, другие являются мобильными, способными производить съемку местности в движении, благодаря использованию переносной головки лазерного сканера. Однако цена таких сканеров препятствует широкому их использованию для целей геологического моделирования.

Фотограмметрия – технология, основывающаяся на обработке изображений для получения цифровой модели поверхности земли (Digital Terrain Model, DTM) [Ullman, 1979; García-Sellés et al., 2014]. Набор изображений с обнажения формирует фотограмметрический блок, в котором вычисляются неизвестные параметры (положение и ориентация камер) для создания модели местности. Развитием этой технологии занимается направление, которое носит название «структура из движения» (Structure from Motion, SfM). Эта технология является эволюционным фотограмметрическим методом, основанным на новых алгоритмах сопоставления изображений и достижений в области компьютерного зрения.

SfM-технология позволяет создавать 3D-модели гораздо более скромными методами, достигая при этом точности лазерных сканеров. Мобильность и оперативность использования такого подхода инициировали дальнейшее развитие метода – появились мощные и производительные алгоритмы и программы обработки изображений, а совершенствование техники (фотоаппаратов, смартфонов) позволило сделать эту технологию доступной для обычного человека. Следует отметить «дружелюбность» данного метода в отношении горных пород. Фотограмметрия имеет некоторые ограничения при съемке однородных фонов, блестящих, отражающих и прозрачных объектов. Горные породы, как правило, имеют шероховатую неоднородную поверхность, которая для такой технологии является наиболее приемлемой.

Разница в результатах использования лазерных сканеров и фотоаппаратов для документирования горных пород остается, хотя бы за счет того, что фотограмметрия позволяет получить более разреженные облака точек, чем лазерная съемка. Но точность полученных моделей в последнее время уже почти сравнялась с результатами, получаемыми лазерными методами [Grussenmeyer et al., 2008; Nuttens et al., 2011], разрешение стало практически одинаковым во многих случаях съемки одного и того же объекта различными методами. Главное же преимущество метода фотограмметрии в том, что его простота и стоимость получения конечного продукта значительно ниже по сравнению с использованием различных LIDAR-устройств. Во многих случаях это обеспечивается еще и применением дешевых или вовсе бесплатных программ постобработки, сопоставимых по мощности с коммерческими программами.

Отдельного внимания требуют специализированные программы создания цифровых

геологических моделей, нацеленных не только на визуализацию, но и на информационное описание геологических обнажений, на работу с их особенностями [Hodgetts, 2014]. Несмотря на узкое применение, можно выделить, например, программу VRGS2020 (Virtual Reality Geological Studio), разработанную в университете г. Манчестера, Великобритания [Integrating..., 2007], использующую результаты как лазерного сканирования, так и полученные при фотограмметрической съемке.

Для использования цифровых моделей при расчете различных горно-технологических процессов применяется программа ShapeMetriX3D компании 3GSM GmbH, Австрия [3gsm...]. Эта программа предназначена для геологического картирования, которое может осуществляться на поверхности, в пределах открытого карьера, и под землей, и основана на получении полигональных моделей с использованием как технологии лазерного сканирования, так и SfM-технологий на базе цифровых зеркальных камер. Результатом такой съемки является модель обнажения с довольно высоким разрешением и значительными размерами. Встроенный аналитический аппарат позволяет выделять трещины, стратиграфические элементы и другие геологические особенности обнажения, проводить замеры залегания этих элементов, их взаимодействие, рассчитывать их геометрические параметры и другие свойства.

Развитию технологии описания цифровых обнажений (DOM) посвящена целая серия публикаций [Bellian et al., 2005; Tavani et al., 2014; Corradetti et al., 2017 и др.], за последние два десятилетия их можно насчитать несколько десятков. Как правило, цифровая 3D-модель обнажения строится с использованием различных специализированных программ. В качестве альтернативы используют свободно распространяемые программы. По своему уровню они зачастую не уступают коммерческим.

Помимо узкоспециализированных программ подготовки цифровых моделей земной поверхности или обнажений на рынке представлено большое количество программ фотограмметрии общего профиля, которые не нацелены на решение узких задач геологии, но позволяют получать очень хорошие результаты, в том числе и в этой сфере. Сегодня можно насчитать более десятка различных программ, позволяющих по серии фотографий построить облако точек, характеризующих различные контрастные участки обнажения, построить его полигональную модель и, наложив текстуру, извлеченную из фотографий, сформировать полноценную модель обнажения.

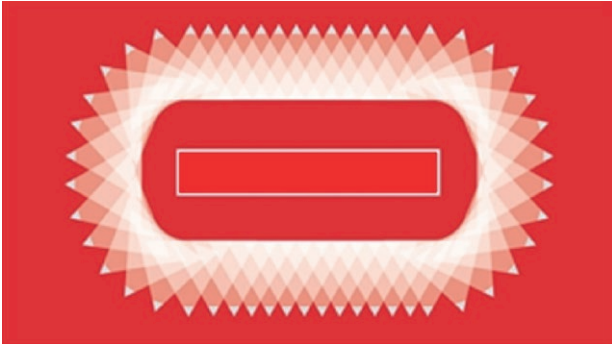


Рис. 1. Порядок фотографирования объекта (расположен в центре) при фотограмметрической съемке, с обходом вокруг этого объекта

Fig. 1. The procedure for photographing an object (located in the center) during photogrammetry surveying, bypassing this object

К особенностям технологии SfM относят некоторые правила, с учетом которых должна осуществляться съемка: снимать необходимо в хороших погодных условиях; объект надо фотографировать со всех сторон; каждый кадр должен пересекать предыдущий; при необходимости детальные виды снимаются отдельно. Главное из достоинств фотограмметрии для геолога – можно получить нужную информацию об объекте, всего лишь один раз выехав на обнажение, а далее проводить визуальный анализ на рабочем месте. По цифровой модели можно произвести замеры ориентации как открытых плоских структур, так и закрытых, визуализировать результаты в виде таблиц, диаграмм или детальной модели элементов обнажения,

то есть можно провести более подробный анализ объекта.

В инструкции по использованию программы 3DF Zephyr Free компании 3DFLOW edition приведена схема фотографирования объекта для получения модели (рис. 1).

Съемка производится со всех сторон. Должны быть получены как минимум две фотографии, на которых видна одна и та же точка. Модель может быть построена только для тех участков, которые были сфотографированы дважды и не менее чем с двух ракурсов. Наложение соседних фотографий по площади должно быть не менее 60 %. Это повышает возможности оцифровки модели по фотографиям, повышает ее точность (рис. 2). Детальное описание процесса фотографирования изложено в инструкциях к соответствующим программам.

В результате обработки сделанных фотографий получаем цифровую полигональную модель обнажения, которая может быть масштабирована, позиционирована в пространстве, изображена в соответствующих ракурсах. Модель можно зарегистрировать в программе с учетом ее пространственных координат. Для этого в поле зрения фотоаппарата при съемке размещают специальные маркеры, координаты которых известны. Если фотоаппарат оснащен GPS-устройством, привязка обнажения на местности может быть осуществлена автоматически.

Основным достоинством фотограмметрического подхода является скорость докумен-

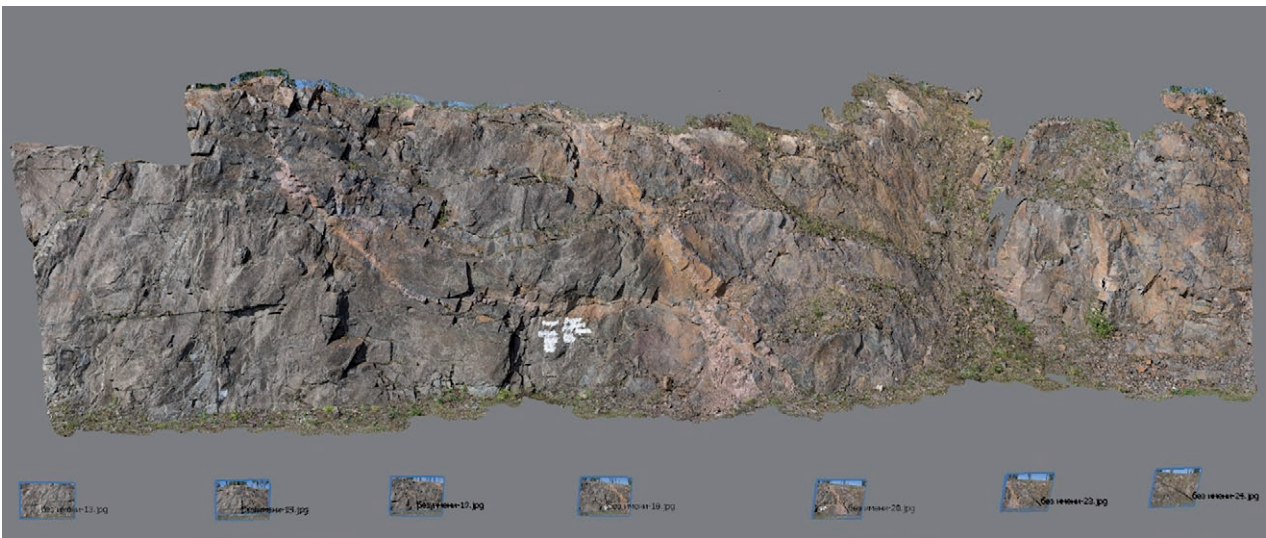


Рис. 2. Модель обнажения с отметкой точек для фотографирования (прямоугольные пиктограммы внизу рисунка – камеры)

Fig. 2. Outcrop model with point marking for photographing (rectangular pictograms beneath the picture are cameras)

тирования обнажения. При соответствующей погоде обнажение в 200 метров может быть задокументировано за 20 минут с учетом детализации отдельных его частей. Дальнейшая обработка требует гораздо больше времени и, в зависимости от мощности компьютера, может занимать более 10 часов. Это обстоятельство преодолевается обычно тем, что все вычисления выполняются в ночное время. Для этого многие программы снабжены специальными командными возможностями автоматизации этой процедуры.

Для подготовки цифровой модели обнажения требуется использование класса программ, которые выполняют операции со снятыми фотографиями. Количество таких фотографий для одной модели ограничивается только размером оперативной памяти компьютера. Для ПК с 32 Гб оперативной памяти оно может достигать нескольких сотен. К таким программам относятся наиболее популярные сегодня Agisoft Photoscan или ее последняя версия Agisoft Metashape – коммерческая программа российского производства. Помимо дорогостоящей (около 3000 долларов США) профессиональной версии предлагается также упрощенная версия, стоимость которой не превышает 200 долларов США, что делает ее доступной. Другая, менее известная, но очень мощная программа – 3DF Zephyr. Ее параметры и цена сопоставимы с предыдущей, однако при использовании в обработке одновременно до 50 фотографий эта программа работает как бесплатная. Meshroom – еще одна бесплатно распространяемая программа, содержащая все основные возможности коммерческих программ и широко используемая среди специалистов. Существует еще более десятка других менее известных как коммерческих, так и свободно распространяемых программ, в той или иной степени используемых разными специалистами, в зависимости от предпочтений и требований. Для специализированной обработки полученных моделей используют вышеуказанные коммерческие программы VRGS2020 и ShapeMetriX3D, программу 3D Reshaper и ее более продвинутые аналоги из набора Leica Cyclone компании Leica Geosystems AG. Другой программой, предназначенной для обработки полученных облаков точек, является свободно распространяемая программа CloudCompare с плагинами, которые расширяют ее возможности в области обработки геологической информации.

Достижения в области получения цифровых моделей поверхностей с помощью фотограмметрии и лазерного сканирования, без сомне-

ния, стали революцией в области обработки 3D-пространства в виде распределенных моделей поверхности. Возможность получения моделей земной поверхности практически любого разрешения с помощью этих технологий позволяет решать множество задач, которые, с одной стороны, значительно облегчают работу геолога, а с другой, позволяют возвращаться к модели много раз, дополняя предыдущие исследования и замеры новыми характеристиками, не учтенными на ранних этапах изучения обнажения.

Описанные технологии имеют свои преимущества при использовании. Часто выполнение замеров пространственного положения на некоторых обнажениях является опасным, а иногда, на высоких участках, просто невозможным. В таких случаях цифровая виртуальная модель обнажения решает эту проблему.

Важным различием в качественных показателях полученных разными методами облаков точек является их плотность на единицу сканируемой поверхности. Если лазерное сканирование дает практически сплошную заливку поверхностей точками, увеличивая размер облачных структур, то результатом работы фотограмметрических программ являются более разреженные поля. Это в дальнейшем может сказаться на качестве выделения поверхностей, характеризующихся как трещины, и снизить точность их выделения. Использование соответствующих функций программы CloudCompare по повышению количества точек на поверхностях трещин в какой-то степени нивелирует эти недостатки, повышая точность выделения трещин из массива.

Важнейшим преимуществом SfM-технологии является стоимость ее реализации и возможность использования с легкими летательными аппаратами – квадрокоптерами, гексакоптерами и другими подобными устройствами. Такие аппараты позволяют использовать для съемки даже зеркальные камеры высокого разрешения.

## **Методика**

Для построения 3D-моделей, рассмотренных ниже, использовалась программа Agisoft Metashape и 3DF Zephyr. Построение 3D-модели в этих программах производится в несколько этапов, все операции выполняются автоматически. Оператору необходимо задать параметры точности модели, которые определяют время, необходимое для ее обработки. Получив готовую модель, пользователь уже может редактировать ее, измерять расстояния



на поверхности модели, рассчитывать площадь поверхности и объем.

Обработка и анализ построенных моделей производились в программе CloudCompare. Программа имеет основной набор инструментов редактирования облачных структур, включая различные алгоритмы для их классификации, манипулирования – вырезания, удаления, копирования и т. д. Для извлечения из облака плоских структур (трещин) в эту программу встроены специализированные плагины: qFacet (для автоматического извлечения трещин) и Compass (ручное извлечение трещин). Оба плагина имеют все необходимые инструменты для идентификации, выделения трещин и получения их элементов залегания. В том числе регистрация облачной модели в географических или местных системах координат.

Плагин qFacet может автоматически извлекать плоские грани из облаков точек, классифицировать грани на основе их ориентации, фильтровать плоскости и отображать их ориентации на стереограмме. Плагин Compass включает два режима: режим карты для определения геологических единиц и режим компаса для измерения ориентации и толщины поверхности. Режим компаса содержит три инструмента для измерения ориентаций: «Плоскость» (используется для измерения ориентации полностью открытых структур), «Трассировка» (позволяет оценить структуру и ориентацию контакта на основе его пересечения с неплоской поверхностью) и «Линейность» (измеряет тренд и погружение линии между двумя точками). Режим карты предоставляет функциональные возможности хранения и организации наборов данных для интерпретации их в более крупных проектах, где необходимо учесть много различных геологических особенностей.

## Результаты

**Геологическая характеристика района работ.** По данным геологических, геофизических материалов и анализу космоснимков в юго-восточной части Фенноскандинавского щита выделяются две системы глубинных разломов: ортогональная и диагональная, определяющие современное блоковое строение земной коры региона [Хазов и др., 2004].

Диагональная система, формирующая границы геоблоков, имеет преимущественное распространение (рис. 3). В меньшей степени проявлена ортогональная система, являющаяся более ранней, что подтверждается смещением глубинных разломов системы в плоскости зон северо-западного простирания. Таким

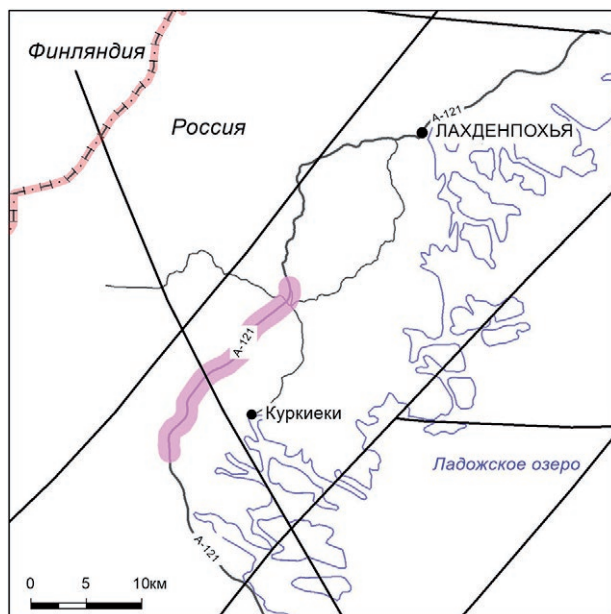


Рис. 3. Обзорная схема района пос. Куркиеки с расположением участка проведения методических работ (выделено розовым цветом) вдоль автотрассы А-121. Сплошные черные линии – региональные разломы [Хазов и др., 2004]

Fig. 3. Overview diagram of the Kurkijoki village area with the location of the methodological work site (highlighted in pink, along the A-121 highway). Solid black lines are regional faults [Khazov et al., 2004]

образом, участок проведения фотограмметрической съемки расположен на некотором удалении от разлома северо-восточного простирания и, в свою очередь, пересекается разломом северо-западного простирания.

Район работ (выделен на рис. 3 широкой розовой кривой) сложен докембрийскими породами лахденпохского людиковийско-калевийского метаморфического комплекса, в котором выделены четыре подкомплекса – ихальский, куркиекский, лумиварский и кухкинский [Степанов и др., 2013]. Три из них, а именно кухкинский, куркиекский и ихальский, развиты в районе работ (рис. 4).

Кухкинский подкомплекс гранитогнейсовый представлен гнейсами гранат-биотитовыми, иногда с кордиеритом, полосами и линзами кристаллосланцев биотит-амфиболовых и амфиболитов, мигматитами по ним.

Куркиекский подкомплекс гиперстено-гнейсовый представлен гнейсами гиперстен-биотитовыми, гиперстен-гранат-биотитовыми, гранат-биотитовыми, мигматитами по ним, полосами и линзами биотит-амфиболовых гнейсов и амфиболитов.

Ихальский подкомплекс амфиболит-графито-гнейсовый представлен гнейсами графит-биотитовыми, гиперстен-гранат-биотитовыми,

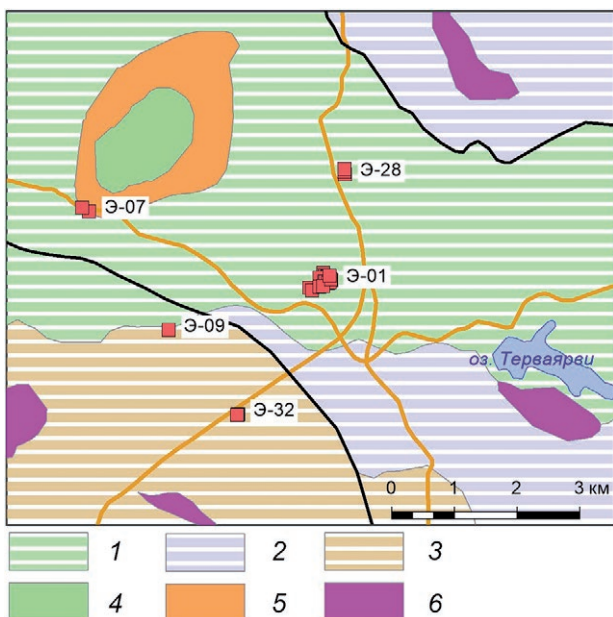


Рис. 4. Схема геологического строения района пос. Куркиеки (Лахденпохский р-н, Республика Карелия):

Лахденпохский метаморфический комплекс: 1 – ихальский подкомплекс амфиболит-гранито-гнейсовый – гнейсы гранат-биотитовые, гранат-амфиболовые; 2 – куркиекский подкомплекс гиперстено-гнейсовый – гнейсы гиперстен-биотитовые, гиперстен-гранат-биотитовые, гранат-биотитовые, мигматиты по ним; 3 – кухкинский подкомплекс гранито-гнейсовый – гнейсы гранат-биотитовые, иногда с кордиеритом, полосы, линзы кристаллосланцев биотит-амфиболовых и амфиболитов. Интрузивные образования: элисенваарско-вуоксинский комплекс субщелочных ультрамафитов, монзонитов и сиенитов: 4 – вторая фаза (сиениты, сиениты кварцевые, дайки лампроитов); 5 – первая фаза (ультрамафиты, меланосиениты полевошпат-биотит-пироксеновые). Нерасчлененные интрузивные образования: 6 – диориты, кварцевые диориты гиперстен-биотитовые, амфибол-биотитовые.

Квадратами с номерами обозначены точки полевых наблюдений. Сплошные черные линии – тектонические нарушения. Геологическая основа скопирована с Государственной геологической карты Российской Федерации. Масштаб 1:200 000, Р-35-XXIV, Р-36-XIX (Сортавала)

Fig. 4. Geological structure scheme of the Kurkijoki village area (Lahdenpohya District, Republic of Karelia):

Lahdenpohsky metamorphic complex: 1 – Ihala subcomplex amphibolite-granite-gneiss – garnet-biotite gneisses, garnet-amphibole; 2 – Kurkijoki hypersthene-gneiss subcomplex – gneisses hypersthene-biotite, hypersthene-garnet-biotite, garnet-biotite, migmatites on them; 3 – Kukhkinsky subcomplex granite-gneiss – garnet-biotite gneisses sometimes with cordierite, strips, lenses of biotite-amphibole shales and amphibolites. Intrusive formations: Elisenvarsko-Vuoksinsky complex of subalkaline ultramafic rocks, monzonites and syenites: 4 – second phase (syenites, quartz syenites, lamproite dikes); 5 – first phase (ultramafites, melano-syenite feldspar-biotite-pyroxene). Undivided intrusive formations: 6 – diorites, quartz diorites hypersthene-biotite, amphibole-biotite.

Squares with numbers indicate the field observation points. Solid black lines are tectonic dislocations. The geological base is copied from the State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200 000, P-35-XXIV, P-36-XIX (Sortavala)

гранат-биотит-гиперстеновыми, гранат-биотитовыми, мигматитами по ним, полосами и линзами амфиболитов и скарноидов.

К интрузивным образованиям района относятся нерасчлененные раннеорогенные образования калевия, представленные диоритами, и ультрамафиты первой фазы, монзониты и сиениты второй фазы элисенваарско-вуоксинского комплекса субщелочных ультрамафитов вепся.

Съемка обнажений осуществлялась вдоль дороги С.-Петербург – Сортавала на участке между поворотом на пос. Куркиеки и г. Лахденпохья. Точки задокументированных обнажений показаны на рис. 5.

Несмотря на то что вопросу соответствия данных ручных замеров и полученных из цифровых моделей посвящено очень много работ, нами было проведено сопоставление данных, полученных двумя этими методами. Другой проблемой, с которой сталкивается исследователь при документировании обнажений, является наличие разного рода рыхлых отложений, растительности, которые мешают определению структурных элементов залегания трещин в массиве.

**Обнажение № 68**, обозначенное в левом нижнем углу рис. 5, находится в сложных захламленных условиях (рис. 6).

Обнажение сложено гранат-биотитовыми гнейсами кухкинского гранито-гнейсового подкомплекса лахденпохского метаморфического комплекса палеопротерозойского возраста. Малодоступно для изучения трещиноватости. Имеющиеся трещины проявлены в стенке, на которой невозможно работать по правилам безопасности (рис. 7, 8).

Ниже показаны трещины, которые выделены по модели ручным способом с помощью плагина Compas (рис. 9). При ручном выделении выбираются наиболее представительные трещины, которые уверенно выделяются программным способом.

Помимо выделения трещин необходимо получить информацию об элементах их залегания. В данном примере замеры трещиноватости выполнены по всему объему обнажения с общей длиной 60 метров. На рис. 10 представлены результаты замеров элементов залегания каждой трещины.

Программы оценки параметров трещиноватости позволяют в дальнейшем обезличить выделенные трещины и работать с ними уже в режиме самостоятельной обработки (рис. 11). В частности, выделенные трещины могут быть экспортированы в другие программы для дополнительного изучения их взаимодействия.

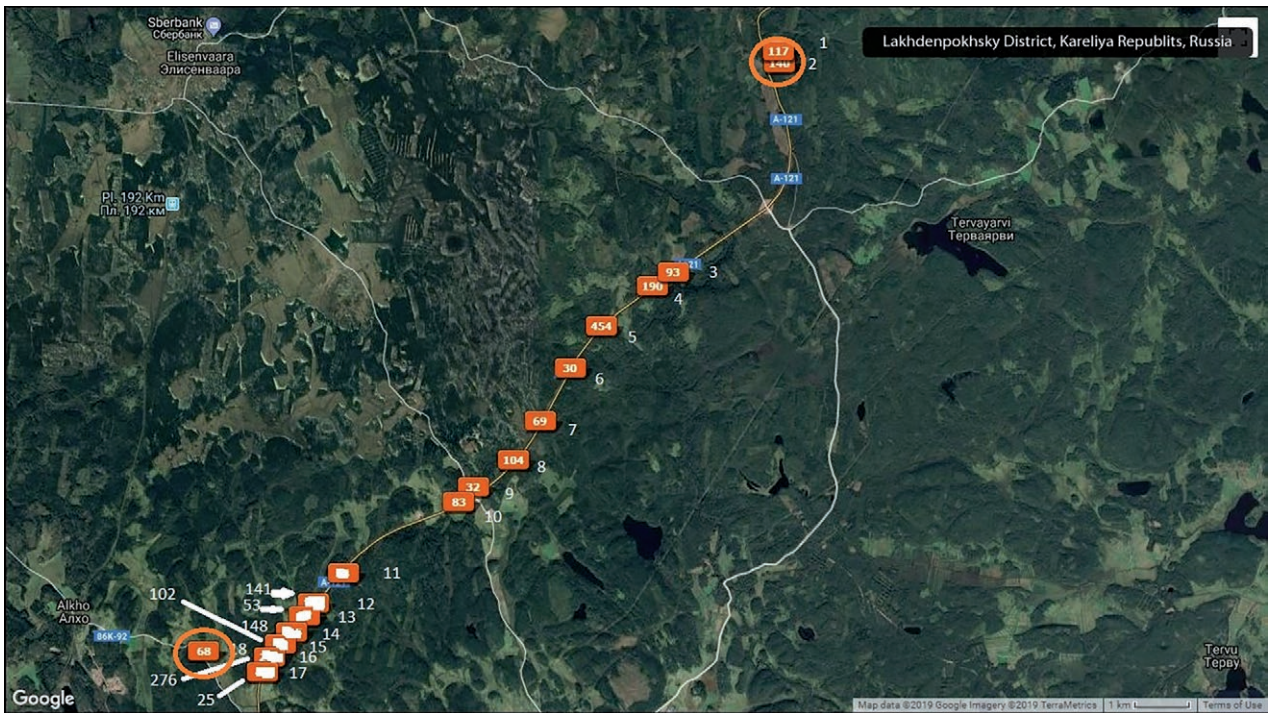


Рис. 5. Схема расположения обсуждаемых объектов. Пилотные объекты выделены окружностями  
 Fig. 5. The layout of the discussed objects. The pilot objects are shown by circles



Рис. 6. Фотография обнажения № 68  
 Fig. 6. Photograph of outcrop No. 68

Неудобные условия залегания обнажения, покрытого обвалившимися остатками камня и элементами почвенно-растительного слоя, не позволяют полноценно провести замеры элементов залегания трещин. Поэтому при полевых работах выполнены единичные замеры

ориентировки разлома и основных систем трещин в двух-трех точках с минимальными перемещениями по скальному уступу. Использование подходов, заложенных в цифровую модель обнажения, позволяет проводить такую работу без угрозы жизни геолога.



Рис. 7. Модель обнажения № 68. Здесь и на рис. 9–11, 13, 15, 16 длина шкалы – 15 метров

Fig. 7. Model of outcrop No. 68. Scale in the lower right corner – 15 meters length



Рис. 8. Увеличенное изображение модели (участок выделен красным квадратом на рис. 7). Здесь и на рис. 14 длина шкалы – 2 метра

Fig. 8. Enlarged image of the model. In Fig. 7 the plot is shown by a red square. The length of the scale is 2 meters



Рис. 9. Результат выделения плоскостей трещин на поверхности обнажения в программе CloudCompare с плагином Compas

Fig. 9. The result of the extraction of fracture planes on the exposed surface in CloudCompare with the Compas plugin

Ниже приводятся диаграммы пространственной ориентировки разлома и трещин по полевым замерам компасом в т. № 68 и пространственной ориентировки трещин, полученные по результатам фотограмметрической съемки в той же точке (рис. 12).

Как при ручной, так и при фотограмметрической съемке зафиксировано отчетливое северо-

ро-западное простирание крутопадающих тектонических нарушений.

**Обнажение № 117** обозначено в правом верхнем углу рис. 5, фотография обнажения показана на рис. 13. Гранат-биотитовые гнейсы ихальского амфиболит-гранитогнейсового подкомплекса лахденпохского метаморфического комплекса обнажены при проведении



Рис. 10. Выделенные плоскости трещин с параметрами залегания  
 Fig. 10. Highlighted fracture planes with orientation parameters

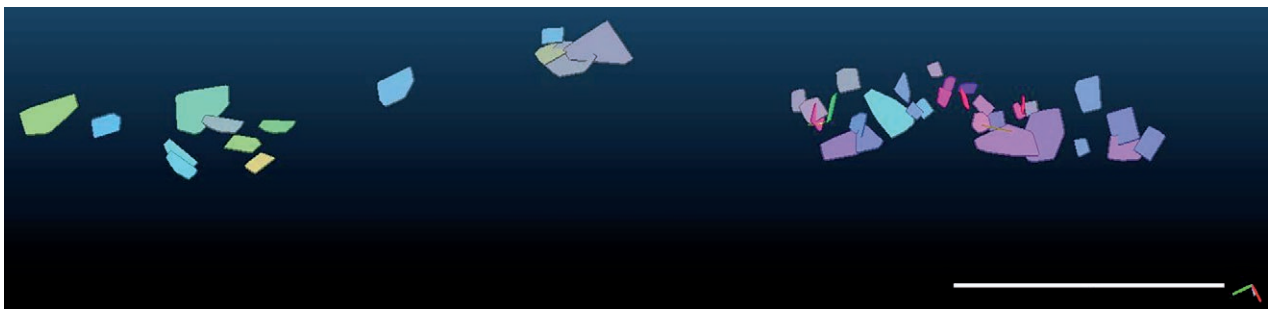


Рис. 11. Трещины в массиве на обнажении № 68  
 Fig. 11. Fractures in the massif at outcrop No. 68

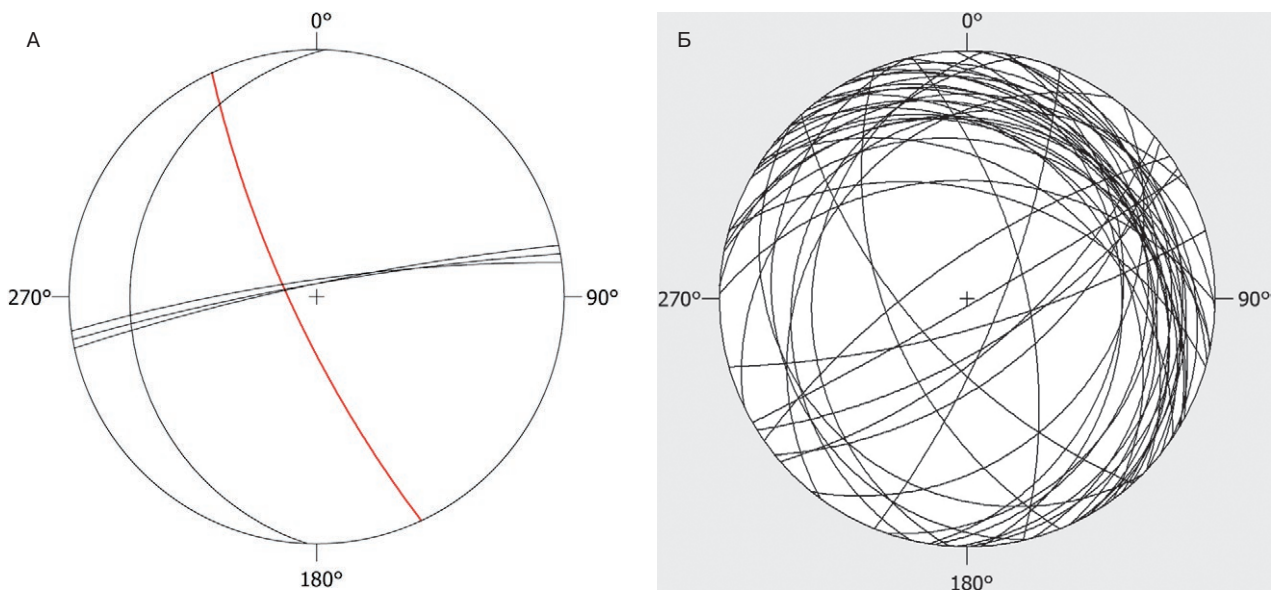


Рис. 12. А – диаграмма ориентировки разлома и трещин в т. № 68 (плохо обнаженный скальный уступ по дороге на пос. Алхо), красная линия – простирание разлома, ручные замеры (5 замеров ориентировки основных систем); Б – диаграмма ориентировки трещин в той же точке по результатам фотограмметрической съемки (46 обработанных плоскостей). Здесь и на рис. 17 диаграммы построены в Stereo 32, равноугольная проекция, верхняя полусфера

Fig. 12. А – orientation diagram of the fault and fractures at p. No. 68 (poorly exposed rocky bench along the road to the v. Alkho), the red line – fault extension, manual measurements (5 measurements of the orientation of the main systems); Б – orientation diagram of fractures at the same point according to the results of photogrammetric surveying (the number of processed planes is 46). (Diagrams are built in Stereo 32, equal-angle projection, upper hemisphere)

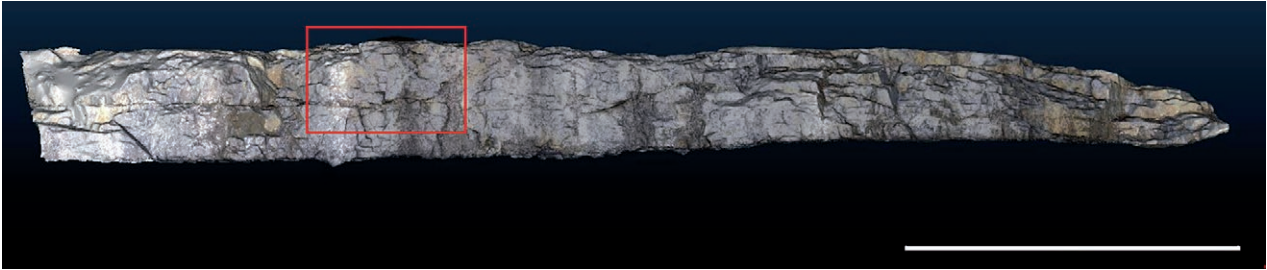


Рис. 13. Обнажение № 117

Fig. 13. Outcrop No. 117



Рис. 14. Укрупненный фрагмент обнажения № 117 (участок выделен на рис. 13 красным прямоугольником)

Fig. 14. An enlarged outcrop fragment representing the area shown by red rectangle in Fig. 13. Scale length is 2 meters

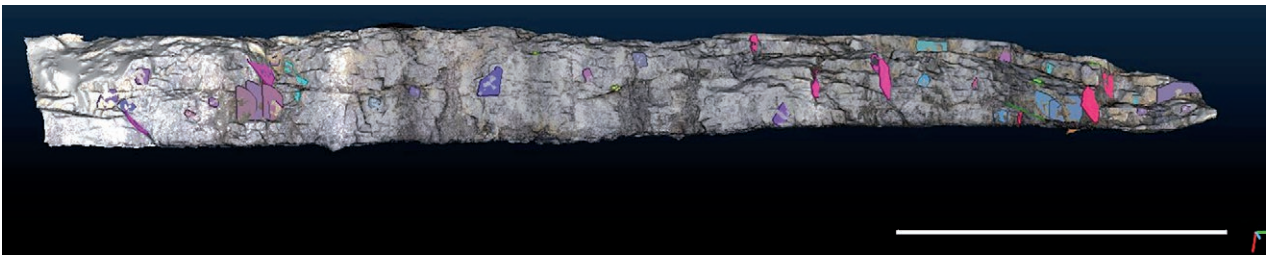


Рис. 15. Основные плоскости трещин, выделенные на обнажении № 117

Fig. 15. The main fracture planes extracted from outcrop No. 117

работ по строительству дороги Приозерск – Сортавала. Массовых взрывов не было, поэтому стенки сохранили свою форму и трещины в стенке сохранили свою исходную ориентировку, что довольно хорошо видно при близком рассмотрении части обнажения (рис. 14). Взрывных трещин практически нет, а те, которые можно наблюдать, расположены вблизи

взрывных скважин с мелкой сеточкой трещин небольшого размера, до 5–10 см.

Процедура выделения трещин по модели в данной точке (рис. 15, 16) аналогична описанной для т. № 68.

На рис. 17 приводятся диаграммы пространственной ориентировки плоскости зеркал скольжения и трещин, замеренных в полевых



Рис. 16. Плоскости трещин (т. № 117). Обнажение скрыто  
 Fig. 16. Fracture planes. The outcrop is hidden

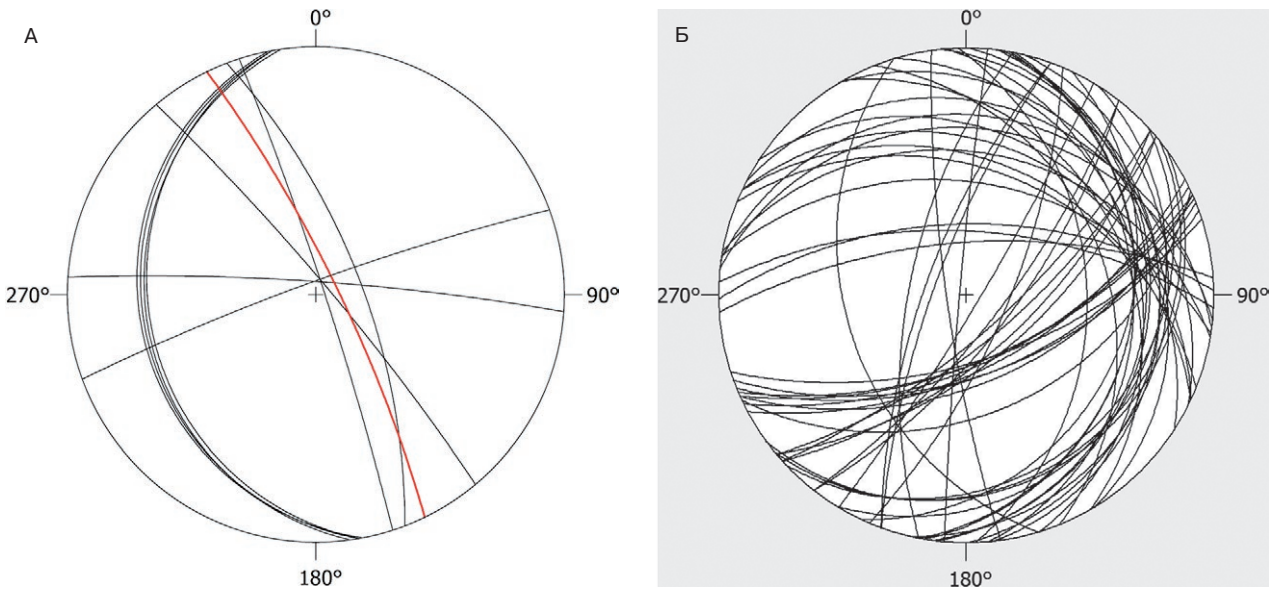


Рис. 17. А – диаграмма ориентировки плоскости зеркала скольжения и трещин в т. № 117, красная линия – плоскость зеркала скольжения, ручные замеры (11 замеров ориентировки основных систем); Б – диаграмма ориентировки трещин в той же точке по результатам фотограмметрической съемки (53 обработанные плоскости)

Fig. 17. А – orientation diagram of the slickenside plane and fractures, at point No. 117, the red line is the plane of the slickenside, manual measurements (11 measurements of the main systems orientation); Б – orientation diagram of the fractures at the same point according to the results of photogrammetric surveying (the number of processed planes is 53)

условиях, и пространственной ориентировки трещин, полученных по результатам фотограмметрической съемки в той же точке.

В данной точке при ручной съемке также фиксируется преобладание северо-западного простирания тектонических нарушений, в то время как при фотограмметрической съемке основные простирания крутопадающих тектонических нарушений варьируют от субширотного до северо-западного.

Высота обнажения, превышающая в некоторых местах 4 метра, ограничивает возможности проведения замеров элементов залегания трещин ручным способом, с помощью геологического компаса. Использование цифровой модели обнажения повышает возмож-

ности для получения хорошего результата многократно.

### Заключение

Использование цифровых моделей земной поверхности дает дополнительные возможности для изучения строения геологического обнажения. Помимо того что модель может быть использована многократно для решения разного рода структурных задач, такой подход рационализирует работу геолога, позволяя в полевых условиях уделять внимание операциям, которые невозможно выполнить в камеральных условиях, – отбор проб, изучение особенностей строения, выделение мелких деталей. Проце-

дура описания обнажения в целом значительно упрощается за счет создания ее реалистичной цифровой модели. Возможность регистрации моделей в различных координатах позволяет очень точно размещать их на картах Google Earth, объединяя множество таких обнажений в единую сеть, а также работать со структурными элементами горных пород и пространственной ориентировкой трещин в единой системе координат.

Опыт предыдущих исследователей и результаты работы на изученных обнажениях показывают неплохую сходимость результатов, полученных традиционными методами с использованием геологического компаса и методами, которые предлагают исследователю современные программы по обработке цифровых моделей.

*Методы цифрового моделирования использовались для обработки материалов съемки геологических обнажений в Лахденпохском районе Республики Карелия в процессе выполнения работ в теме № 210 по государственному заданию в соответствии с проектом № АААА-А18-118020290175-2.*

## Литература

- Степанов К. И., Санин Д. М., Санина Г. Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1: 200 000. Изд. второе. Карельская серия. Листы Р-35-XXIV, Р-36-XXIX, Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 231 с.
- Фролов А. Виды лазерных сканеров. Принципы измерения // НГКИ. 3D Инженерные изыскания [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ngce.ru/pg\\_publications11.html](http://www.ngce.ru/pg_publications11.html) (дата обращения: 23.04.2020).
- Хазов Р. А., Шаров Н. В., Исанина Э. В. Глубинное строение и металлогения Приладожья // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С. 55–74.
- 3gsm software&measurements [Электронный ресурс]. URL: <https://3gsm.at/produkte/> (дата обращения: 23.04.2020).
- Bellian J. A., Kerans C., Jennette D. C. Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling // J. Sediment. Res. 2005. No. 75. P. 166–176.
- Cabrelles M., Seguí A. E., Navarro S., Galcerá S., Portalés C., Lerma J. L. 3D photorealistic modelling of stone monuments by dense image matching // Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symp., Newcastle upon Tyne, UK. 2010. P. 121–124.
- Chiabrando F., Sammartano G., Spanò A. Historical buildings models and their handling via 3D survey: from points clouds to user oriented HBIM // The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XLI-B5, XXIII ISPRS Congress (Prague, Czech Republic, July 12–19, 2016). 2016. P. 633–640.
- Corradetti A., Tavani S., Parente M., Iannace A., Vinci F., Pirmez C., Torrieri S., Giorgioni M., Pignalosa A., Mazzoli S. Distribution and arrest of vertical through-going joints in a reservoir-scale carbonate platform (Sorrento Peninsula, Italy): insight from integrating field survey and digital outcrop model // J. Struct. Geol. Vol. 108. 2018. P. 121–136. doi: 10.1016/j.jsg.2017.09.009
- García-Sellés D., Granado P., Muñoz J. A., Gratacos O., Carrera N., Arbues P. Capture and geological data extraction: tools for a better analysis and digital outcrop modelling // Vertical Geol. Conf., Switzerland, 5–7 February, 2014. University of Lausanne, 2014.
- Grussenmeyer P., Landes T., Voegtle T., Ringle K. Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings // The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing, 2008. P. 213–219.
- Hodgetts D. Comparison of digital outcrop and conventional data collection approaches for the characterization of naturally fractured reservoir analogues. // Geol. Soc. Spec. Publ. 2014. Vol. 374, no. 1. P. 51–77. doi: 10.1144/SP374.13EID:2-s2.0-84920469719
- Integrating digital and traditional field techniques using virtual reality geological studio (VRGS) 69<sup>th</sup> European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2007: Securing The Future. Incorporating SPE EUROPEC 2007, 2007 // Conference paper EID: 2-s2.0-55849127395.
- Murphy M., McGovern E., Pavia S. Historic building information modelling – adding intelligence to laser and image based surveys // Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-5/W16, 2011. ISPRS Trento 2011 Workshop, 2–4 March 2011, Trento, Italy.
- Murphy M., McGovern E., Pavia S. Historic Building Information Modelling – adding intelligence to laser and image-based surveys of European classical architecture // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2013. No. 76. P. 89–102.
- Nuttens T., Maeyer P., Wulf A., Goossens R., Stal C. Comparison of 3D accuracy of terrestrial laser scanning and digital photogrammetry: an archeological case study // Remote Sensing and Geoinformation. EARSeL, 2011.
- Tavani S., Granado P., Corradetti A., Girundo M., Iannace A., Arbués P., Muñoz J. A., Mazzoli S. Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in google earth via openplot and photostan: An example from the Khaviz Anticline (Iran) // Comput. Geosci. Vol. 63. 2014. P. 44–53. doi: 10.1016/j.cageo.2013.10.013
- Ullman S. The interpretation of structure from motion // Proceed. Royal Society of London. 1979. B-203, P. 405–426.

Поступила в редакцию 04.05.2020



## References

Frolov A. Vidy lasernykh skanerov. Printsypy izmereniya [Types of laser scanners. Measurement principles]. NGKI. 3D Engineering Surveys. URL: [http://www.ngce.ru/pg\\_publications11.html](http://www.ngce.ru/pg_publications11.html) (accessed: 23.04.2020).

Khazov R. A., Sharov N. V., Isanina E. V. Glubinnoe stroenie i metallogeniya Priladozh'ya [Deep structure and metallogeny of Ladoga]. *Geol. i poleznye iskopayemye Karelii* [Geol. and Minerals of Karelia]. Vol. 7. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2004. P. 55–74.

Stepanov K. I., Sanin D. M., Sanina G. N. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:200 000 [State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200 000]. 2<sup>nd</sup> Ed., Karelian Series, Sheets P-35-XXIV, P-36-XIX, Explanatory Note]. Moscow: MF VSEGEI, 2013. 231 p.

3gsm software&measurements. URL: <https://3gsm.at/produkte/> (accessed: 23.04.2020).

Bellian J. A., Kerans C., Jennette D. C. Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling. *J. Sediment. Res.* 2005. No. 75. P. 166–176.

Cabrelles M., Seguí A. E., Navarro S., Galcerá S., Portalés C., Lerma J. L. 3D photorealistic modelling of stone monuments by dense image matching. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symp., Newcastle upon Tyne, UK. 2010. P. 121–124.

Chiabrando F., Sammartano G., Spanò A. Historical buildings models and their handling via 3D survey: from points clouds to user oriented HBIM. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XLI-B5, XXIII ISPRS Congress (Prague, Czech Republic, July 12–19, 2016). 2016. P. 633–640.

Corradetti A., Tavani S., Parente M., Iannace A., Vinci F., Pirmez C., Torrieri S., Giorgioni M., Pignatola A., Mazzoli S. Distribution and arrest of vertical through-going joints in a reservoir-scale carbonate platform (Sorrento Peninsula, Italy): insight from integrating field survey and digital outcrop model. *J. Struct. Geol.* Vol. 108. 2018. P. 121–136. doi: 10.1016/j.jsg.2017.09.009

García-Sellés D., Granado P., Muñoz J. A., Gratacos O., Carrera N., Arbues P. Capture and geological data extraction: tools for a better analysis and digital

outcrop modeling. *Vertical Geol. Conf., Switzerland, 5–7 February, 2014*. University of Lausanne, 2014.

Grussenmeyer P., Landes T., Voegtle T., Ringle K. Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing, 2008. P. 213–219.

Hodgetts D. Comparison of digital outcrop and conventional data collection approaches for the characterization of naturally fractured reservoir analogues. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 2014. Vol. 374, no. 1. P. 51–77. doi: 10.1144/SP374.13EID:2-s2.0-84920469719

Integrating digital and traditional field techniques using virtual reality geological studio (VRGS) 69<sup>th</sup> European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2007: Securing The Future. Incorporating SPE EUROPEC 2007, 2007. *Conference paper EID: 2-s2.0-55849127395*.

Murphy M., McGovern E., Pavia S. Historic building information modelling – adding intelligence to laser and image based surveys. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVIII-5/W16, 2011. ISPRS Trento 2011 Workshop, 2–4 March 2011, Trento, Italy.

Murphy M., McGovern E., Pavia S. Historic Building Information Modelling – adding intelligence to laser and image-based surveys of European classical architecture. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 2013. No. 76. P. 89–102.

Nuttens T., Maeyer P., Wulf A., Goossens R., Stal C. Comparison of 3D accuracy of terrestrial laser scanning and digital photogrammetry: an archeological case study. *Remote Sensing and Geoinformation*. EARSeL, 2011.

Tavani S., Granado P., Corradetti A., Girundo M., Iannace A., Arbués P., Muñoz J. A., Mazzoli S. Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in google earth via openplot and photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). *Comput. Geosci.* Vol. 63. 2014. P. 44–53. doi: 10.1016/j.cageo.2013.10.013

Ullman S. The interpretation of structure from motion. *Proceed. Royal Society of London*. 1979. B-203, P. 405–426.

Received May 04, 2020

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Шеков Виталий Александрович

заместитель директора по НИР, к. т. н.  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: shekov@krc.karelia.ru  
тел.: +79217260273

## CONTRIBUTORS:

### Shekov, Vitaly

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: shekov@krc.karelia.ru  
tel.: +79217260273

**Иванов Андрей Алексеевич**

научный сотрудник  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: ivanov@krc.karelia.ru  
тел.: +79114015513

**Крылова Светлана Андреевна**

инженер-геолог  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: konfetka007@yandex.ru

**Ivanov, Andrey**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: ivanov@krc.karelia.ru  
tel.: +79114015513

**Krylova, Svetlana**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: konfetka007@yandex.ru

## ИСТОРИЯ НАУКИ

УДК 551 + 930.25

### О НАУЧНЫХ БИОГРАФИЯХ ГЕОЛОГОВ: ИЗ ПЕРЕПИСКИ С. И. РОМАНОВСКОГО И В. А. СОКОЛОВА

**Ю. Л. Войтеховский**

*Санкт-Петербургский горный университет, Россия  
Российское минералогическое общество, Санкт-Петербург, Россия*

Впервые публикуется переписка видных российских историков науки – докторов геолого-минералогических наук С. И. Романовского и В. А. Соколова, охватывающая период 1977–1983 годов и касающаяся в основном принципов и проблем написания научных биографий на примере биографий геологов А. П. Карпинского, А. А. Иностранцева, В. М. Тимофеева, П. А. Борисова, П. А. Пузыревского, Ф. Ю. Левинсона-Лессинга, Г. П. Гельмерсена. Особое внимание уделено приоритетам в открытии фациального закона Головкинского – Вальтера – Иностранцева. Дискутируется вопрос о соотношении эмпирического и теоретического в геологической науке. Статья адресована историкам науки, в первую очередь – исследователям геологии Карелии.

**Ключевые слова:** история геологии; научная биография; Геолком; эмпирика и теория в геологической науке; фациальный закон Головкинского – Вальтера – Иностранцева.

#### **Yu. L. Voytekhovsky. OF SCIENTIFIC BIOGRAPHIES OF GEOLOGISTS: CORRESPONDENCE BETWEEN S. I. ROMANOVSKY AND V. A. SOKOLOV**

The article is the first publication of the correspondence between prominent Russian historians of science Dr. Sci. S. I. Romanovsky and Dr. Sci. V. A. Sokolov covering the period 1977–1983 and dealing mainly with the principles and challenges of writing scientific biographies through the example of geologists A. P. Karpinsky, A. A. Inostrantsev, V. M. Timofeev, P. A. Borisov, P. A. Puzyrevsky, F. Yu. Levinson-Lessing, G. P. Helmersen. Special attention is paid to the priority in the discovery of the facies law of Golovkinsky – Walter – Inostrantsev. The relationship between empirical and theoretical aspects in geological science is discussed. The article is addressed to historians of science, first of all to researchers of the geology of Karelia.

**Keywords:** history of geology; scientific biography; Geolkom; empirical and theoretical aspects in geological science; the Golovkinsky – Walter – Inostrantsev facies law.

## Введение

В Комиссии по истории Российского минералогического общества хранится личный архив сотрудника ВСЕГЕИ, доктора геолого-минералогических наук С. И. Романовского (1937–2005), переданный для исследования и использования в научных целях его родственниками. В нем находятся рукописи изданных книг [Романовский, 1979, 1981, 1987, 1995, 1997, 1999, 2000, 2003, 2004] и богатая переписка с видными геологами и историками науки, в том числе с доктором геолого-минералогических наук В. А. Соколовым (1927–1999), директором Института геологии (1966–1978, 1984–1986) и председателем президиума Карельского филиала АН СССР (1976–1986), автором серии книг об исследователях геологии Карелии [Соколов, 1972, 1976, 1977, 1981, 1984; Соколов, Кударенко, 1981; Соколов, Эрте, 1984]. Переписка начата С. И. Романовским и охватывает два интенсивных периода: февраль–ноябрь 1977 г. (с выпадением летних экспедиционных месяцев), август–декабрь 1981 г. и поздравительную открытку В. А. Соколова к Новому, 1984 году. Идеальный порядок в архиве С. И. Романовского позволяет надеяться, что этим переписка исчерпана, а перерывы обусловлены естественными причинами. Его письма напечатаны на машинке, всегда подписаны и датированы. В архиве подшиты вторые экземпляры. Некоторые письма В. А. Соколова написаны от руки и не датированы. Они приведены в сканированных копиях, что позволяет проверить правильность прочтения непростого почерка. Время написания писем легко устанавливается из контекста.

Переписка сосредоточена почти исключительно на принципах и проблемах написания научных биографий на примере биографий отечественных геологов А. П. Карпинского, А. А. Иностранцева, В. М. Тимофеева, П. А. Борисова, П. А. Пузыревского, Ф. Ю. Левинсона-Лессинга и Г. П. Гельмерсена. Единственное отклонение – монография С. И. Романовского «Седиментологические основы литологии», посланная им на рассмотрение В. А. Соколову и впоследствии успешно защищенная как докторская диссертация. Впрочем, и она тематически близка к обсуждаемой проблеме – приоритетам в открытии фациального закона Головкинского – Вальтера – Иностранцева. Дискутируется вопрос о соотношении эмпирического и теоретического в геологической науке. Содержательная, аргументированная, принципиальная, подчас острая, но всегда корректная переписка двух видных геологов и историков

науки показывает пример забытого ныне эпистолярного жанра. Орфография и пунктуация текстов сохранены за исключением нескольких очевидных опечаток. Статья адресована в первую очередь исследователям геологии Карелии.

## Переписка С. И. Романовского и В. А. Соколова

*Романовский – Соколову*

Глубокоуважаемый В. А. Соколов!

Прошу прощения за такое не очень удачное обращение, но я, к сожалению, не знаю Вашего имени-отчества. Обращаюсь же я к Вам с просьбой – прислать мне, если это возможно, Вашу книгу «Создатель школы карельских геологов. Очерк о жизни и деятельности профессора А. А. Иностранцева». Дело в том, что в Ленинграде я этой книги не встречал, а меня данная тема весьма интересует, поскольку в последнее время я работал над научной биографией современника А. А. Иностранцева проф. Н. А. Головкинского. Эта книга выйдет в издательстве «Наука» в 1978–79 г. Я обязательно ее Вам подарю. Не исключено, что материалы Вашей книги как-то скорректируют и мою рукопись.

С уважением, (подпись) 11 февраля 1977 г.

*Романовский – Соколову*

Глубокоуважаемый Владимир Алексеевич!

Большое спасибо за присланную книгу об Иностранцеве. Я ее с удовольствием прочел и считаю, что она написана мастерски и читается как хорошее художественное произведение. Роль Иностранцева как регионального геолога и создателя школы карельских геологов показана достаточно убедительно. А вот его значение как ученого-геолога осталось практически за рамкой книги. Историки науки полагают, что Иностранцев знаменит как автор привычной для нас формулировки основного фациального закона (а это было бы немало, если бы было так), но я думаю, что это не соответствует истине. По крайней мере, исторические изыскания, которые я проводил в связи с написанием биографии Н. А. Головкинского, убедили меня в этом.

Вообще говоря, личность Иностранцева мне лично несимпатична. Я не встретил ни одного источника, в которых бы давалась высокая оценка его научным заслугам (одного шунгита все же маловато). Тот же В. О. Ковалевский не считал его ученым геологом («собственно

же научная часть для него чужда»). Иностранцев действительно принял у Ковалевского магистерский экзамен, но его докторскую диссертацию не оценил и отклонил от защиты, тем самым сильно усугубив ту моральную депрессию, в которой находился В. О. и которая привела его в конечном итоге к самоубийству. Трудно согласиться с Вами, что Иностранцев от издания к изданию улучшал свой учебник «Геология». Просмотренные мною все издания (по крайней мере, разделы «Стратиграфическая геология») убедили меня в обратном. Того же мнения придерживались и члены Геолкома, а в известном споре Никитин – Иностранцев правым все же оказался С. Н. Никитин.

Еще раз большое Вам спасибо.

Ваш (подпись). 21 февраля 1977 г.

*Соколов – Романовскому*

Уважаемый Сергей Иванович!

Благодарен Вам за лестную оценку, которую Вы дали моей книге об А. А. Иностранцеве. Спасибо за труд, затраченный на прочтение книги, и письмо, которое я получил сегодня. Ваша неожиданная откровенность в высказывании оценок (разных) настроила меня на эту же волну. Поэтому начну с вопроса: откуда Вам стало известно о выходе в свет книги об Иностранцеве? Она издана в издательстве «Карелия» небольшим тиражом и не имела, как мне кажется, большой рекламы. Ответ на этот вопрос представляет интерес для выявления каналов прохождения информации. Вы затронули ряд вопросов, и не могу не откликнуться на них.

1. Отношение автора к своему подопечному «герою». Симпатичен или несимпатичен? Мне думается, что это в изложении материала о роли реального «героя», имеющего свои заслуги или промахи, так же, как и личную жизнь, привычки, характер и т. д., не может играть эмоционального давления на изложение фактов. Главное – его творческий вклад, оставленный им потомкам. И здесь могу сказать, порой не соглашаясь с Вами, что роль А. А. Иностранцева в развитии русской геологии чрезвычайно велика. Велика, несмотря на противоречивость его натуры и самоутверждение. Вы делаете ссылку на «историков науки». Это хорошо, но это еще не аргумент, ибо историки – это люди, которым свойственно ошибаться. Могу привести десятки ссылок на больших авторитетов (тоже людей), в которых (ссылках) отмечается главенствующая роль моего «героя» в ряде начинаний.

Таким образом, ссылки (пересказ) – это субъективные мнения людей (а кто даст гаран-

тию, что они не наделены людскими чертами своего личного восприятия другого лица через призму симпатий или антипатий, рожденных случайными впечатлениями или молвой), которые очень противоречивы. Главное все же – это реально существующие ценности, т. е. труды «героя» (в данном случае), проверенные опытом последователей или непоследователей. Надеюсь, что роль А. А. Иностранцева в русской геологии не исчерпывается его «шунгитовым» вкладом и трудами по «Олонцу». Алтай, Кавказ и другие районы помнят его. Впрочем, не считаю, что он нуждается в адвокатах, и его работы не потеряют своего значения, даже если кто-то их мало знает или не признает. Простите за откровенность. Кстати, было бы интересно получить библиографию работ, в которых ругают моего «героя», кое-что мне известно, но может быть не все.

2. Вам симпатичен В. О. Ковалевский. Но прочитав его переписку с братом, читатель может (по его письмам, порой лицемерным) потерять к нему всякое уважение. Так можно ли его противопоставлять А. А. Иностранцеву? Но и тот и другой были люди с массой «темных» сторон, хотя у того и другого были и светлые.

3. А. А. Иностранцев как один из деятелей Геолкома (ВСЕГЕИ) всегда боролся против ущемления им (Геолкомом) прав университетских работников. Был он прав или неправ – это другой вопрос. Но А. А. никогда не скрывал своих взглядов и был последователен в своих высказываниях. Это приносило ему много неприятностей, но он держался своего курса. Знаю, что Геолком отвечал ему тем же. Не говорят ли в Вас «гены Геолкома»?

4. Не думаю, что рассказ о Головкинском выиграет от противопоставления его Иностранцеву. «Историки науки», как Вы говорите и как это мне известно, пишут о законе Головкинского – Иностранцева, восстанавливая приоритет русской науки (против Вальтера), но никогда не противопоставляют одного другому. Может быть (и скорее так), мне не известно ничего о взаимоотношениях Иностранцева и Головкинского (кроме того, что первый рекомендовал второго в члены Санкт-Петербургского общества естествоиспытателей), это мешает понять Вас, но подспудная «ревность» одного к другому, о которой Вы говорите, нарастающая.

5. Об учебнике «Геология». Его оценка в настоящее время – это в значительной мере дело вкуса.

Выезжаю в командировку, тороплюсь с письмом. Прошу извинить меня за некоторую сумбурность его. Но Ваши замечания вызва-

ли желание ответить. Простите за откровенность некоторых суждений. Это Ваша волна (Ваш тон).

Мне было бы интересно познакомиться с Вашими материалами на стыке Иностранцев – Головкинский, так как должен продолжить свое «хобби» и написать об Иностранцеве «в масштабе России». Это запланировано на ближайший отпуск.

К сожалению, не имею уже своих книг, изданных ранее, о В. М. Тимофееве и П. А. Борисове и не могу послать их Вам. Но ожидаю выхода в свет брошюры о П. А. Пузыревском, и буду рад отправить ее на Ваш суд.

Всего доброго (подпись). 9 марта 1977 г.

*Романовский – Соколову*

Глубокоуважаемый Владимир Алексеевич!

Благодарю за обстоятельное и откровенное письмо. Постараюсь ответить на все Ваши вопросы.

1. О Вашей книге я узнал из Реферативного журнала № 1 за 1977 г.

2. Согласен с Вами в том, что личность «героя» не должна довлеть при освещении научных результатов. Я же затронул этот вопрос только в связи с тем, что для Вас (как научного биографа Иностранцева) его личность, его чисто человеческие качества не могут быть безразличными, поскольку, с моей точки зрения, биографии ученых имеют смысл только в двух отношениях: показывают преемственность идей ученого современной наукой и несут воспитательную функцию, прививая вкус начинающим исследователям к серьезной научной работе. Последнее же достигается тогда, когда читатель будет «покорен» личностью ученого – его человеческими и гражданскими качествами. Ясно, что далеко не все исторические личности обладают такими многогранными достоинствами, а потому биографы (во имя достижения высших целей) «закрывают глаза» на теневые стороны характера своих «героев» и всю расписывают их добродетели. В Вашей книге, правда, этого нет, но нет (или почти нет) ЛИЧНОСТИ (так в письме. – Ю. В.) Иностранцева, его живого портрета и от этого, мне кажется, книга немного проигрывает, хотя в целом работа Ваша мне очень понравилась и я даже немного по-хорошему позавидовал Вашему легкому и местами весьма образному изложению. Это обязательное условие книг такого плана, а далеко не все авторы его выполняют.

3. О «законе Головкинского – Иностранцева». Здесь я не могу согласиться с Вами.

У Иностранцева есть формулировка этого закона (1872 г.) (без обоснования) и есть схема слоеобразования (1885 г.), которую он привел в своем учебнике в качестве противопоставления схеме Головкинского. Помните, А. А. пишет: «...против этого положения недавно (подчеркнуто в письме. – Ю. В.) (1868 г. – С. Р.) было высказано возражение...» Возражал – Головкинский. Он же утверждал принцип возрастного скольжения слоев, чего не признавал Иностранцев. Поэтому он и привел свою схему, чтоб «опровергнуть» Головкинского. Схемы их не дополняют, а исключают друг друга – здесь историки науки (начиная с Сократова) явно ошибаются. Я даже написал на эту тему специальную статью «К вопросу об истории открытия и авторстве основного фациального закона», где доказывается, что этот закон может именоваться либо «законом Головкинского», либо «... Головкинского – Вальтера», но никак не «...Головкинского – Иностранцева».

4. Моя книга о Головкинском (в которой я, конечно, не противопоставляю этих «героев») выйдет в издательстве «Наука», и как только она появится на свет, обязательно Вам вышлю.

Ваш (подпись).

14 марта 1977 г.

*Романовский – Соколову*

Глубокоуважаемый Владимир Алексеевич!

Я не имею возможности пока подарить Вам обещанную книгу о Н. А. Головкинском, так как только в мае я ее сдал в издательство «Наука» и, по всей вероятности, она выйдет где-то в начале 1979 г. Поэтому пока восполняю этот пробел монографией «Седиментологические основы литологии», которую я думаю защищать в качестве докторской диссертации. Я был бы Вам очень признателен, Владимир Алексеевич, если бы Вы сообщили мне свое мнение об этой моей работе. Мне это чрезвычайно важно.

Заранее признателен Вам (подпись).

16 августа 1977 г.

*Соколов – Романовскому*

Глубокоуважаемый Сергей Иванович!

Виноват перед Вами – не поблагодарил за присланную мне книгу. Все откладывал ответ до той поры, когда прочитаю работу и смогу выполнить Вашу просьбу – высказать о книге свое мнение. Но привходящие обстоятельства помешали мне внимательно познакомиться (пока!) с книгой. Первое впечатление: связано, кое-что спорно? (подчеркивание и вопросительный знак – простым карандашом, скорее всего, рукой С. И. Романовского. – Ю. В.), ряд

Чтобы уважались  
Сергей Иванович!

Винавал пред Вами. — Не  
поднаходими за прислан-  
ную мне книгу. Все ат-  
тестация была до той  
игры, когда началось ра-  
боту и смогу выработать  
Вашу просьбу — все время  
о книге свое мнение. Но  
прежде всего об объекте  
исследования мое мнение  
хотел бы изложить (надо!)  
с книгой. Книга американ-  
ская, но — это интересно, ред  
раздел об объекте. На мой  
взгляд можно выдвигать  
на защиту.

С уважением  
В. А. Соколов

Рис. 1. Письмо В. А. Соколова С. И. Романовскому  
Fig. 1. V. A. Sokolov's letter to S. I. Romanovsky

разделов обстоятелен. На мой взгляд можно выдвигать на защиту.

С уважением (подпись).

(Без даты, написано от руки (рис. 1))

*Романовский – Соколову*

Глубокоуважаемый Владимир Алексеевич!

Большое спасибо за присланную книжку о П. А. Пузыревском – прочел ее сразу с большим удовольствием. Пишете Вы отлично: легко, живо и с большой любовью к описываемому герою. Жаль только, что все эти небольшого объема биографии издаются Вами в местном издательстве – мал тираж и узок круг читателей. Почему бы Вам не печататься в «Науке» в серии научных биографий? Или, по крайней мере, использовать обе эти возможности. Обидно, что в Вашей книжке о Пузыревском довольно много досадных опечаток. Вот только то, что я заметил:

1. Журнал «Русская старина» назван «Русской стороной», с. 12.

2. Квенштедт назван Канштедтом, с. 19. (Или, может быть, был такой геолог?)

3. Н. И. Кокшаров по всей книге проходит как Н. И. Кошкаров...

В ЛО ААН (Ленинградское отделение архива Академии наук. – Ю. В.), в фонде Бутлерова и Ковалевских есть любопытная переписка их по поводу вакансии экстраординарного профессора, которую Пузыревский хотел сначала заместить Головкинским (письмо Головкинского Бутлерову), затем И. И. Мечниковым (?) – письмо Мечникова В. О. Ковалевскому, и уж после того как по разным причинам эти затеи лопнули, вакансию, кажется, заместили Иностранцевым.

Я познакомился с правнуком Н. А. Головкинского, который мне сообщил, что их семья тщательно сохраняла богатейший архив ученого, в котором, в частности, была его переписка

с Пузыревским, но во время войны почти все погибло. Архив хранился в Крыму.

Буду рад, если наш обмен материалами по историко-биографической тематике не прекратится.

Ваш (подпись).

21 ноября 1977 г.

Соколов – Романовскому

Глубокоуважаемый Сергей Иванович!

Сегодня с удовольствием прочитал в журнале «Вопросы истории...» рецензию на Вашу книгу о Головкинском. Очень рад, что книга получила добрую оценку, с которой я согласен. Поздравляю. Посылаю Вам очередную книжечку из серии (а получилась уже серия из пяти книг) «Геологи в Карелии». А «Иностранцев», растерзанный и ущемленный, застрял в изда-

тельстве в Москве, хотя обещали издать еще в прошлом году. Жду его уже без интереса.

С добрыми пожеланиями (подпись).

(Без даты, написано от руки (рис. 2))

Романовский – Соколову

Глубокоуважаемый Владимир Алексеевич!

Вернувшись из отпуска, с удовольствием обнаружил на столе конверт от Вас с очередной (завидую Вашей продуктивности!) книжкой. Большое Вам спасибо за внимание и память. Конечно же, сразу прочел. Как и все Ваши читанные мною работы такого плана, написана она превосходно – легко, ясно и даже местами занимательно, а ведь это немаловажный фактор для читаемости таких книг. Еще раз большое спасибо.

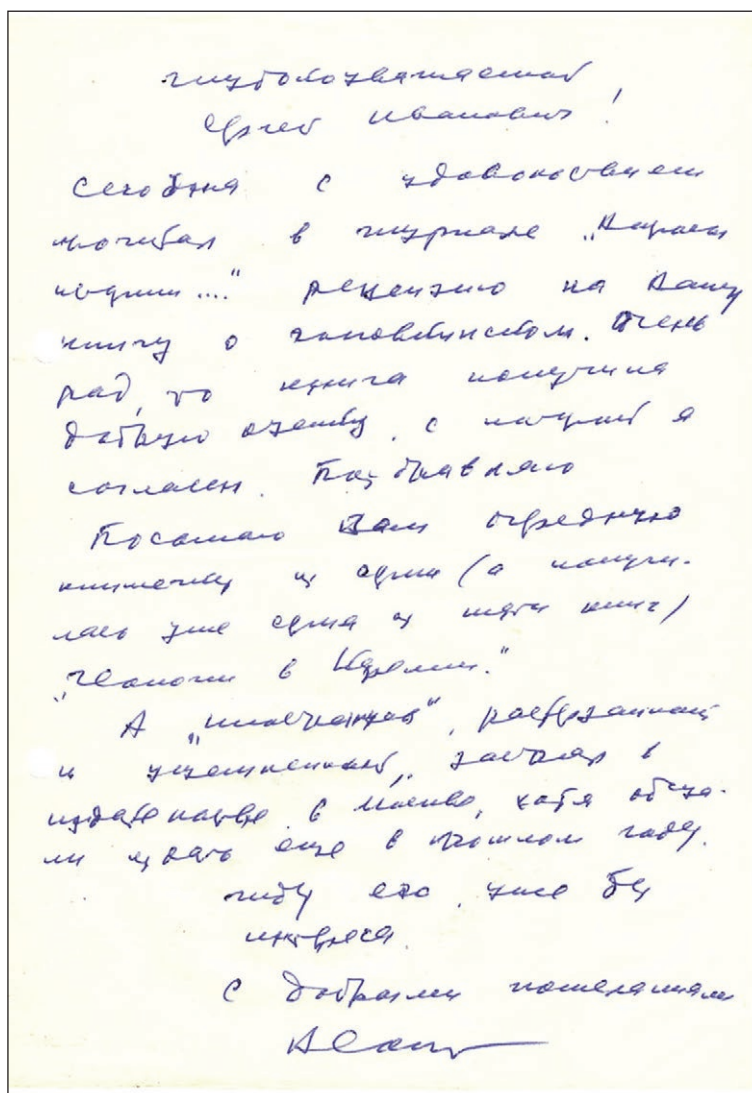


Рис. 2. Письмо В. А. Соколова С. И. Романовскому

Fig. 2. V. A. Sokolov's letter to S. I. Romanovsky



Кстати, просматривая в свое время в ЛО ААН фонд 265 (Карпинского), я обнаружил – для меня это было новым, Вы же, конечно, знаете – переписку Карпинского и Ольденбурга с ВЧК по поводу Левинсона-Лессинга, который как будто был эсером и за то и был арестован. Хорошо, что впоследствии это не сказалось на его биографии.

Владимир Алексеевич, как Вы смотрите на то, если я напишу рецензию на Вашего «Иностранцева» (которого, правда, пока не имею) в журнал «Вопросы ИЕиТ». В свое время член редколлегии этого журнала И. А. Резанов предложил мне рецензировать биографии геологов, конечно, прилично написанные. Он же обещал оперативную публикацию. Спрашиваю же я Вас потому, что знаю оперативность многих авторов в этом вопросе, а повторять чей-то труд не хотелось бы. Поэтому если пока никто не изъявил такового желания, то я с удовольствием к Вашим услугам. Да, Резанов советовал даже обратиться к Вам с предложением, чтобы Вы (для оперативности) прислали бы мне рукопись; тогда бы рецензию синхронизировали бы с выходом книги: идеальная оперативность. Но я постеснялся обращаться к Вам с этим.

Мой «Карпинский» вторично стерилизуется в Горлите: уже было четыре! (так в письме. – Ю. В.) корректуры, и еще, как говорится, не вечер... Выйдет, пришлю.

Из ВАКа ни звука. Не знаю – что делать, что предпринять.

Всего доброго. Ваш (подпись). 24 августа  
1981 г.

*Соколов – Романовскому*

Глубокоуважаемый Сергей Иванович!

Вчера вернулся из Финляндии и застал дома Ваше письмо и «потерянного» мною «А. А. Иностранцева».

Благодарю за приятные слова о «Ф. Ю. Л.-Л.» и за Вашу самопожертвенность – предложение написать рецензию об «А. А. И.». Буду Вам признателен за это, если Вы сочтете книгу «прилично написанной» (она мне больше нравилась в рукописи). Пока имел печатные отклики на свои опусы лишь на страницах газет. О чем-то желании сделать это в журнале мне пока не сообщали. Поэтому еще раз благодарю Вас. Не скрою, что для меня было бы приятно получить анализ и отзыв специалиста, знающего и понимающего сей хобби-труд, целиком на всю карельскую серию: В. М. Тимофеев, П. А. Борисов, А. А. Иностранцев, П. А. Пузыревский, Ф. Ю. Левинсон-Лессинг. Ибо оказалось, что это уже серия – Карельская геоло-

гическая школа Петербургского (Ленинградского) университета – если расставить книги в порядке: учитель (создатель) – ученики. Это способствовало бы пропаганде местных изданий. А это тоже нужно.

Надеюсь, что Ваши огорчения временны, и желаю их скорейшего окончания.

Всего доброго (подпись). 17 сентября  
1981 г.

*Романовский – Соколову*

Глубокоуважаемый Владимир Алексеевич!

Сразу, как только я отправил Вам предыдущее письмо, я уселся за написание рецензии на «Иностранцева». Написав 1.5 страницы, решил уточнить в редколлегии «Вопросов истории естествознания и техники» – нужна ли им рецензия. Оказалось, звонил я им не зря. Говорил я с Резановым. Он сказал буквально следующее: книги этой серии издаются при нашем институте в большом числе, и на редколлегии (кстати, при обсуждении рецензии Соловьева на моего «Головкинского») решили ограничить рецензирование этих книг. Боятся, чтобы не было как у Крылова: кукушка хвалит петуха... Рецензировать решили лишь объемные биографии-монографии о выдающихся ученых. Так что я грешен перед Вами, что обещал невыполнимое. А где еще, кроме этого журнала, можно было бы эту рецензию напечатать, не знаю...

Что касается Вашего предложения об обзоре «карельской серии», которая благодаря Вам действительно стала серией, не знаю тем более, где печатать такую рецензию. Думаю, что ВИЕиТ ее не возьмут. А что если дать газетную статью? Для петрозаводской газеты? Или это Вас не устраивает? Кроме того, из этой Вашей серии я не видел книжек о Тимофееве и Борисове.

Еще раз извините за невыполнимое обещание. Но, видит Бог, хотел как лучше.

Всего доброго (подпись). 23 сентября  
1981 г.

*Соколов – Романовскому*

Глубокоуважаемый Сергей Иванович!

Бог оценит порыв Вашей души... Не вышло с рецензией в ВИЕиТ и не надо. Жалко, что Вы потеряли время на 1.5 страницы...

Отвечаю на Ваши вопросы. Наша республиканская газета «Ленинская правда» (185610, Петрозаводск, ул. Космонавта Г. Титова, д. 3) печатает рецензии на местные издания, особенно в странице «выходного дня». И, естественно, отзыв из Ленинграда будет, думаю, встре-

чен хорошо: карельская тематика, начинание издательства «Карелия» (там тоже люди и им приятно прочитать и узнать, что об этом прочитали в «начальстве» о их хороших делах), память о людях, много сделавших для Карелии и т. д. Здесь, конечно, более подойдет обзор серии.

Еще есть у нас журнал «Север», в котором иногда появляются рецензии и на краеведческие книги. В общем, кое-какие пути есть.

Книги о В. М. Тимофееве (1960 г. издания) у меня, к сожалению, не сохранилось (только 1 экземпляр в личной библиотеке). Но может быть Вы сможете прочитать машинопись заново переделанной работы, которую готовлю для научно-биографической серии? Был бы Вам признателен за краткий отзыв (для издательства) и пожелания, замечания – это уже по делу. До конца года обещал отправить рукопись З. К. Соколовской. Она (рукопись) будет готова для чтения дней через пять. Если «да», то жду сигнала для пересылки. Эта же рукопись восполнит пробел в «серии».

Книгу о П. А. Борисове прилагаю. Последний экземпляр из библиотеки (она также отсутствует в моих запасах, а в магазинах уже давно нет), даже со штампом «контрольный экземпляр», вот так.

Всего хорошего! (Подпись) (Без даты)

*Романовский – Соколову*

Глубокоуважаемый Владимир Алексеевич!

Вы балуете меня и пока явно мною не заслуженно. Зачем Вы лишили свою библиотеку контрольного экземпляра «Человека, влюбленного в камни» и уж, по крайней мере, поторопились подписать книгу. Я бы ее мог Вам выслать обратно, теперь же... Большое еще раз Вам спасибо.

Теперь о деле. Думаю, что и писать, да и читать тоже интереснее в журнальном варианте. Так что, ежели ваш журнал «Север» печатает отклики на краеведческие книги, то будем писать туда. Я, кстати, уже печатал в «Неве» отзыв на книгу Кумока «Карпинский» (в серии ЖЗЛ). К тому же, в данном случае журнал должно заинтересовать то, что рецензироваться будет не отдельная книга, а сразу целых пять – действительно серия (подчеркнуто в письме. – Ю. В.), выпускаемая трудами одного (пока) человека. И это ценно и интересно.

Если возможно, наведите, пожалуйста, справки в журнале (кстати, он издается в Петрозаводске?) и сообщите мне результаты и заодно адрес редакции «Севера». Если Ваш ответ будет положительным, моя статья не заставит

ждать. Пришлю быстро. Кстати, узнайте, пожалуйста, каков допустим объем? Хочется написать не просто рецензию, а некое эссе о Вашей серии и вообще о биографической и краеведческой литературе.

Что касается моего отзыва для научно-биографической серии, то какой может быть разговор – конечно, напишу. Высылайте рукопись «Тимофеева», а я ее верну Вам с отзывом, а потом через несколько дней дошлю и статью для «Севера».

Жду ответа. Ваш (подпись). 5 октября 1981 г.

P. S. В ожидании ответа из ВАКа пишу книжку «А. П. Карпинский в Петербурге – Ленинграде», тоже, кстати, краеведческую.

*Соколов – Романовскому*

Глубокоуважаемый Сергей Иванович!

Сегодня мне повезло: 1. Получил Ваше письмо (с согласием прорецензировать рукопись о В. М. Тимофееве), а через несколько часов звонок С. Н. Немцова помог урегулировать доставку рукописи Вам. (Вы соседи – это здорово.) Буду ждать Ваших замечаний и отзыв для Москвы. 2. Главный редактор журнала «Север» (185670, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 13 – редакция сосед нашего филиала) Дмитрий Яковлевич Гусаров сказал, что он ждет интересную и серьезную статью-рецензию до 5–6 страниц машинописи. Этот журнал обслуживает Северо-Запад СССР.

Всего доброго (подпись). 12 октября 1981 г.

*Романовский – Соколову*

Дорогой Владимир Алексеевич!

Разные обстоятельства долгое время мешали мне сесть за Вашу рукопись о В. М. Тимофееве и написать отзыв. Теперь эти «обстоятельства» временно позади и я выполняю, к сожалению, лишь частично, свое обещание. Частично потому, что отзыв, который Вы просили, я написать не могу и вот по каким причинам.

Однако прежде чем писать о сути дела, должен сказать, что рукопись эта (подчеркнуто в письме. – Ю. В.) (по разным причинам) мне показалась менее удачной, чем другие, написанные Вами ранее книги. Почему так получилось, не знаю. Хотя местами и в этой Вашей работе чувствуется свойственное Вам «легкое перо» и живость стиля.

Теперь о главном. Мое мнение – Тимофеев не подходит к научно-биографической серии АН. Если судить по Вашей о нем работе, то он чисто региональный, карельский геолог,

хотя и крупный, и основатель, и человек прекрасный. Но этого все же мало. Ведь геология исторически складывалась как наука эмпирическая, опирающаяся на региональный материал, но тем не менее развивалась благодаря не региональным достижениям, а теоретическим. Только вклад в теоретическую компоненту науки дает жизнь ученому в истории науки, и только эта жизнь, в свою очередь, дает право на написание его биографии в такой широко-вещательной серии, как издаваемая «Наукой» (последнее предложение отчеркнуто двойной линией простым карандашом на левом поле письма. – Ю. В.). Ведь в каждом регионе есть свои первопроходцы, открыватели, основатели и прочие корифеи. О них пишут в краеведческих изданиях, в сериях «Люби и знай свой край» и т. п. Возможно, у Тимофеева и есть что-то по части теоретических разработок или хотя бы обобщающие работы, выходящие за пределы карельского материала, но в Вашей рукописи этого нет. Сомнение же возникло у меня потому, что в Вашей книге об Иностранцеве ни звука не сказано о его важнейшей теоретической находке – законе слоеобразования, который иногда именуют законом Иностранцева, иногда – законом Иностранцева – Вальтера. Только из-за этого закона, да еще «Иностранцевии» знают Вашего героя сегодняшние студенты, да и большинство геологов, а в Вашей книге центр тяжести смещен в сторону карельских работ ученого. Возможно, и в данном случае так. Тогда дело поправимо. К тому же я не член Редколлегии и не мне решать – кому место, а кому не место в научно-биографической серии. Вопрос же этот я поднял еще и потому, что листаж серии из года в год сокращают, «под геологов» его дают без охоты, а ведь еще нет книг о Ферсмани, Левинсоне-Лессинге, Заварицком, Андрусове, Обручеве, Борисяке, Лутугине, Чернышеве и других крупнейших наших ученых.

И второе, что мне не очень понравилось в Вашей рукописи. Она, как и книга об Иностранцеве, производит впечатление не научной биографии, а краеведческого очерка: подробное описание маршрутов, обилие местных названий, усвоить которые, ежели нет перед глазами подробной карты Карелии, невозможно, сильно отягощают текст и отвлекают внимание. Чувствуется, что написав ранее об этих же героях в местное краеведческое издание, Вы почти не изменили жанру, принимаясь за научную биографию для издательства «Наука». То же и в очерке о Тимофееве. В справедливости моего предположения (я не читал Вашей книжки о Тимофееве) убеждает и то, что Вы местами

(при описании, к примеру, сути микроскопического метода, шлифов и т. п.) пишете столь популярно, что прямо хочется открыть соответствующие места ваших краеведческих работ издательства «Карелия».

К тому же очень много всякого мелкого бытовизма, уж совсем неуместного: как, откуда, куда ехал, кто встречал с перечислением фамилий прорабов, коллекторов и др., что проезжал, видел, какой суммы аванс получил на работы, кто предложил в адъюнкт-геологи, сколько заседаний Присутствия посетил; при описании финляндской экскурсии поденное маршрутирование с перечислением фамилий практически (в большинстве) незначимых и т. д., и т. д. Этими мелкими бытовыми штрихами буквально нашпигована вся рукопись. А ведь Тимофеева, казалось бы, надо представить, прежде всего, как ученого-геолога, а не только исследователя геологии Карелии. Получается же, что Тимофеев (если судить только по рукописи) добросовестно в течение многих лет учил студентов, ездил летом в Карелию и разбирался в сложностях ее геологического строения. Дорогой Владимир Алексеевич, позвольте Вас спросить: ну и что? Ведь книга посвящается не патриоту и знатоку региона, а ученому-геологу? А его и не видно. К тому же, зачем Вы используете (в изобилии) прямую речь? В тех Ваших книжках это было на месте, а здесь жанр все же другой.

Еще раз очень прошу Вас, не обижайтесь на меня, пожалуйста. Я очень люблю научно-биографическую серию, слежу за ней, возможно и излишне ревностно. Отсюда и мои возражения. Повторяю еще раз: Ваши краеведческие очерки о геологах Карелии мне очень нравятся и по задумке, и по исполнению. И коли у меня получится что-либо путное, обязательно напишу статью о них в журнал «Север». Да, получили ли Вы «Карпинского»? Что-то Вы ничего не написали, и я начал думать – не затеряла ли бандероль почта.

Всего, всего Вам хорошего.

Ваш (подпись).

2 декабря 1981 г.

*Соколов – Романовскому*

Дорогой Сергей Иванович!

Получил «Карпинского» и бандероль с рукописью о Тимофееве. Спасибо большое за то и другое. Вот только задержался с ответом (отчеты, планы, стройка, финансы и прочие дела в конце года) – прошу помиловать!

1. Книгу о Карпинском читал с большим интересом, понимая всю трудность ее написания «в собственном ключе» на фоне большого числа

публикаций (разных) об А. П. К. Книга, на мой взгляд, удалась, чему во многом способствовало привлечение нового фактического материала «золотой жилы» ЛО ААН. Материал свежий, сочный и удачно вплетен в общую ткань повествования. Более других мне понравилась третья часть, может быть из-за ведомственного патриотизма или из-за более полной разработки и показа трудного этапа истории Академии в период революционных бурь. Много новой (не сквозной) информации и в других частях и главах. Сам Александр Петрович страницами книги показан более человечным и жизненным без лишнего умиления со стороны, чем грешат многие жизнеописания великих людей. В общем рад и от души поздравляю с большой авторской победой. Уверен, что книга найдет благодарного читателя. Есть ли недочеты? Ну, эти «субъектики» всегда найдутся. Это ... «много всякого бытовизма ... как, откуда, куда ехал, сколько заседаний Присутствия посетил» ... и т. д.

Цитата взята из Вашего письма по Тимофееву, а ее оценка подходит и к этой книге. Это вроде шутка, как иллюстрация того мучительного дела, когда приходится расставаться с трудом добытыми фактами и фактиками. Но это мелочь, так же как неизбежные повторения одного и того же в разных главах. Но есть один мотив, который как-то настораживает – кое-где автор не только идет с «героем» по жизни, переживает с ним все его радости и огорчения, но и пытается опередить «героя», домысливать за него... Не знаю, может быть так и надо, но мне это показалось излишним. Замечания небольшие, дежурные, ибо книга хорошая.

2. Благодарен за правдивые и квалифицированные суждения по рукописи – буду ее доделывать, так как она включена в перспективный план издательства и, как сообщила мне З. К. Соколовская, «вес героя» обсужден и сомнений не вызывает, с чем я вполне согласен. Да, действительно, переход с одной серии в другую процесс болезненный, тем более, что у этой серии до сих пор нет своего кредо по сути. Для кого печатаются книги серии: узких специалистов; всех, кто интересуется наукой и т. д.? Каков должен быть расклад между биографической, наукотворческой и научной информацией? Как глубоко и широко нужно влезать в отдельные научные частности (когда-то открытия и т. д.)? Возникает масса вопросов, которые меняются во времени... Решают их авторы (с помощью редактора) сами, зная только, что нельзя допускать вольностей с прямой речью.

В. М. Тимофеев, по моему убеждению, это эпоха в становлении научного направления по геологии докембрия в СССР, хотя его деятельность и протекала на Балтийском щите. И очень плохо, что в рукописи я не смог этого в полной мере показать. Постараюсь добавить необходимые штрихи. «Регионализм» Тимофеева был его силой (а не слабостью), так как через последовательное обогащение фактурой привел его к теоретическим выводам по стратиграфии, металлогении, литологии и т. д. докембрия, которые послужили основой в конечном итоге для современного бума в геологии докембрия вообще. Да, согласен. Это надо показать. При первом заходе не получилось. Спасибо за откровенность.

Работать в этом жанре становится все труднее, так как нет времени на библиотеки и архивы за пределами Петрозаводска, а у нас материалов мало. Замахиваемся на Ф. Ю. Левинсона-Лессинга, а «ЛО ААН» закрыли – нет доступа к фонду Ф. Ю. (он только-только обрел там права гражданства). Но ничего, побарахтаемся. Еще раз большое спасибо.

С наступающим Новым годом!

Всего наилучшего. Ваш (подпись).

(Без даты)

*Соколов – Романовскому*

С Новым годом, дорогой Сергей Иванович!

Добрых желаний, начинаний и их свершения в 1984. Вы опередили меня своей весточкой – это хорошо. Жалею, что не получилось у Вас с очерком или как еще назвать задуманное... Но ничего. Отпускаю Вам грехи пред Новым годом. Радуюсь Вашей активности и желаю ее развивать. Мои же дела с развитием хобби в своем исполнении отстают от планов и желаний. Пробавляюсь мелкими газетными статьями, чтоб рука отошла от бюрократии. Хотя сдал в «Науку» книгу о В. М. Тимофееве (против Вашего желания) и в «Карелию» отдал (до 4-х листов) о Г. П. Гельмерсене. Обещают издать обе работы в I полугодии 1984 г. Собрался очень интересный материал о Ф. Ю. Левинсоне-Лессинге, хотелось бы продолжить «гельмерсеновскую» тему (у Вас, вероятно, что-то отложилось о нем в связи с А. П. Карпинским), просят написать о К. О. Кратце. Планов много, но я же чиновник. А сейчас много дел в связи с Геологическим конгрессом (доклады, экскурсии), да и хозяйственные дела филиальные не дают прорыву. Вот поплакался и легче стало.

С наилучшими пожеланиями (подпись).

(Без даты (рис. 3))

но я не отвечаю. А сейчас много дел в связи с переводом. Ты раскрой конверт, пожалуйста, и дай мне посмотреть на письмо. Оно очень интересное. Я не могу сказать тебе спасибо.

С любовью задант, Игорь  
 Павел Иванович!

Доброе утро, Игорь!  
 и их свершили в 1984.

Вот тебе письмо моего  
 изобретения - это хорошо. Думаю, что  
 не помню у Вас с собой  
 или как еще назвать задуманное,  
 но можно. Думаю, если  
 перед нами наша задача, то  
 можно ее реализовать. Мне бы  
 хотелось с Вами работать. Если  
 можно, то хотелось бы  
 и написать. Предлагаю  
 написать статью, по  
 поводу и программы. Если  
 есть в "Науке" книга о В.И.С.  
 Марков (сорт моего изобретения)  
 и в "Науке" есть (до 4-го  
 о Г.П. Гельмерсе, о нем  
 обе работы в "Науке" и  
 собрания о нем интересные  
 статьи о Ф.О. Великом. Думаю,  
 хотелось бы продолжить  
 исследование Феликса (4-го, 5-го,  
 6-го, 7-го, 8-го, 9-го, 10-го, 11-го, 12-го, 13-го, 14-го, 15-го, 16-го, 17-го, 18-го, 19-го, 20-го, 21-го, 22-го, 23-го, 24-го, 25-го, 26-го, 27-го, 28-го, 29-го, 30-го, 31-го, 32-го, 33-го, 34-го, 35-го, 36-го, 37-го, 38-го, 39-го, 40-го, 41-го, 42-го, 43-го, 44-го, 45-го, 46-го, 47-го, 48-го, 49-го, 50-го, 51-го, 52-го, 53-го, 54-го, 55-го, 56-го, 57-го, 58-го, 59-го, 60-го, 61-го, 62-го, 63-го, 64-го, 65-го, 66-го, 67-го, 68-го, 69-го, 70-го, 71-го, 72-го, 73-го, 74-го, 75-го, 76-го, 77-го, 78-го, 79-го, 80-го, 81-го, 82-го, 83-го, 84-го, 85-го, 86-го, 87-го, 88-го, 89-го, 90-го, 91-го, 92-го, 93-го, 94-го, 95-го, 96-го, 97-го, 98-го, 99-го, 100-го, 101-го, 102-го, 103-го, 104-го, 105-го, 106-го, 107-го, 108-го, 109-го, 110-го, 111-го, 112-го, 113-го, 114-го, 115-го, 116-го, 117-го, 118-го, 119-го, 120-го, 121-го, 122-го, 123-го, 124-го, 125-го, 126-го, 127-го, 128-го, 129-го, 130-го, 131-го, 132-го, 133-го, 134-го, 135-го, 136-го, 137-го, 138-го, 139-го, 140-го, 141-го, 142-го, 143-го, 144-го, 145-го, 146-го, 147-го, 148-го, 149-го, 150-го, 151-го, 152-го, 153-го, 154-го, 155-го, 156-го, 157-го, 158-го, 159-го, 160-го, 161-го, 162-го, 163-го, 164-го, 165-го, 166-го, 167-го, 168-го, 169-го, 170-го, 171-го, 172-го, 173-го, 174-го, 175-го, 176-го, 177-го, 178-го, 179-го, 180-го, 181-го, 182-го, 183-го, 184-го, 185-го, 186-го, 187-го, 188-го, 189-го, 190-го, 191-го, 192-го, 193-го, 194-го, 195-го, 196-го, 197-го, 198-го, 199-го, 200-го, 201-го, 202-го, 203-го, 204-го, 205-го, 206-го, 207-го, 208-го, 209-го, 210-го, 211-го, 212-го, 213-го, 214-го, 215-го, 216-го, 217-го, 218-го, 219-го, 220-го, 221-го, 222-го, 223-го, 224-го, 225-го, 226-го, 227-го, 228-го, 229-го, 230-го, 231-го, 232-го, 233-го, 234-го, 235-го, 236-го, 237-го, 238-го, 239-го, 240-го, 241-го, 242-го, 243-го, 244-го, 245-го, 246-го, 247-го, 248-го, 249-го, 250-го, 251-го, 252-го, 253-го, 254-го, 255-го, 256-го, 257-го, 258-го, 259-го, 260-го, 261-го, 262-го, 263-го, 264-го, 265-го, 266-го, 267-го, 268-го, 269-го, 270-го, 271-го, 272-го, 273-го, 274-го, 275-го, 276-го, 277-го, 278-го, 279-го, 280-го, 281-го, 282-го, 283-го, 284-го, 285-го, 286-го, 287-го, 288-го, 289-го, 290-го, 291-го, 292-го, 293-го, 294-го, 295-го, 296-го, 297-го, 298-го, 299-го, 300-го, 301-го, 302-го, 303-го, 304-го, 305-го, 306-го, 307-го, 308-го, 309-го, 310-го, 311-го, 312-го, 313-го, 314-го, 315-го, 316-го, 317-го, 318-го, 319-го, 320-го, 321-го, 322-го, 323-го, 324-го, 325-го, 326-го, 327-го, 328-го, 329-го, 330-го, 331-го, 332-го, 333-го, 334-го, 335-го, 336-го, 337-го, 338-го, 339-го, 340-го, 341-го, 342-го, 343-го, 344-го, 345-го, 346-го, 347-го, 348-го, 349-го, 350-го, 351-го, 352-го, 353-го, 354-го, 355-го, 356-го, 357-го, 358-го, 359-го, 360-го, 361-го, 362-го, 363-го, 364-го, 365-го, 366-го, 367-го, 368-го, 369-го, 370-го, 371-го, 372-го, 373-го, 374-го, 375-го, 376-го, 377-го, 378-го, 379-го, 380-го, 381-го, 382-го, 383-го, 384-го, 385-го, 386-го, 387-го, 388-го, 389-го, 390-го, 391-го, 392-го, 393-го, 394-го, 395-го, 396-го, 397-го, 398-го, 399-го, 400-го, 401-го, 402-го, 403-го, 404-го, 405-го, 406-го, 407-го, 408-го, 409-го, 410-го, 411-го, 412-го, 413-го, 414-го, 415-го, 416-го, 417-го, 418-го, 419-го, 420-го, 421-го, 422-го, 423-го, 424-го, 425-го, 426-го, 427-го, 428-го, 429-го, 430-го, 431-го, 432-го, 433-го, 434-го, 435-го, 436-го, 437-го, 438-го, 439-го, 440-го, 441-го, 442-го, 443-го, 444-го, 445-го, 446-го, 447-го, 448-го, 449-го, 450-го, 451-го, 452-го, 453-го, 454-го, 455-го, 456-го, 457-го, 458-го, 459-го, 460-го, 461-го, 462-го, 463-го, 464-го, 465-го, 466-го, 467-го, 468-го, 469-го, 470-го, 471-го, 472-го, 473-го, 474-го, 475-го, 476-го, 477-го, 478-го, 479-го, 480-го, 481-го, 482-го, 483-го, 484-го, 485-го, 486-го, 487-го, 488-го, 489-го, 490-го, 491-го, 492-го, 493-го, 494-го, 495-го, 496-го, 497-го, 498-го, 499-го, 500-го, 501-го, 502-го, 503-го, 504-го, 505-го, 506-го, 507-го, 508-го, 509-го, 510-го, 511-го, 512-го, 513-го, 514-го, 515-го, 516-го, 517-го, 518-го, 519-го, 520-го, 521-го, 522-го, 523-го, 524-го, 525-го, 526-го, 527-го, 528-го, 529-го, 530-го, 531-го, 532-го, 533-го, 534-го, 535-го, 536-го, 537-го, 538-го, 539-го, 540-го, 541-го, 542-го, 543-го, 544-го, 545-го, 546-го, 547-го, 548-го, 549-го, 550-го, 551-го, 552-го, 553-го, 554-го, 555-го, 556-го, 557-го, 558-го, 559-го, 560-го, 561-го, 562-го, 563-го, 564-го, 565-го, 566-го, 567-го, 568-го, 569-го, 570-го, 571-го, 572-го, 573-го, 574-го, 575-го, 576-го, 577-го, 578-го, 579-го, 580-го, 581-го, 582-го, 583-го, 584-го, 585-го, 586-го, 587-го, 588-го, 589-го, 590-го, 591-го, 592-го, 593-го, 594-го, 595-го, 596-го, 597-го, 598-го, 599-го, 600-го, 601-го, 602-го, 603-го, 604-го, 605-го, 606-го, 607-го, 608-го, 609-го, 610-го, 611-го, 612-го, 613-го, 614-го, 615-го, 616-го, 617-го, 618-го, 619-го, 620-го, 621-го, 622-го, 623-го, 624-го, 625-го, 626-го, 627-го, 628-го, 629-го, 630-го, 631-го, 632-го, 633-го, 634-го, 635-го, 636-го, 637-го, 638-го, 639-го, 640-го, 641-го, 642-го, 643-го, 644-го, 645-го, 646-го, 647-го, 648-го, 649-го, 650-го, 651-го, 652-го, 653-го, 654-го, 655-го, 656-го, 657-го, 658-го, 659-го, 660-го, 661-го, 662-го, 663-го, 664-го, 665-го, 666-го, 667-го, 668-го, 669-го, 670-го, 671-го, 672-го, 673-го, 674-го, 675-го, 676-го, 677-го, 678-го, 679-го, 680-го, 681-го, 682-го, 683-го, 684-го, 685-го, 686-го, 687-го, 688-го, 689-го, 690-го, 691-го, 692-го, 693-го, 694-го, 695-го, 696-го, 697-го, 698-го, 699-го, 700-го, 701-го, 702-го, 703-го, 704-го, 705-го, 706-го, 707-го, 708-го, 709-го, 710-го, 711-го, 712-го, 713-го, 714-го, 715-го, 716-го, 717-го, 718-го, 719-го, 720-го, 721-го, 722-го, 723-го, 724-го, 725-го, 726-го, 727-го, 728-го, 729-го, 730-го, 731-го, 732-го, 733-го, 734-го, 735-го, 736-го, 737-го, 738-го, 739-го, 740-го, 741-го, 742-го, 743-го, 744-го, 745-го, 746-го, 747-го, 748-го, 749-го, 750-го, 751-го, 752-го, 753-го, 754-го, 755-го, 756-го, 757-го, 758-го, 759-го, 760-го, 761-го, 762-го, 763-го, 764-го, 765-го, 766-го, 767-го, 768-го, 769-го, 770-го, 771-го, 772-го, 773-го, 774-го, 775-го, 776-го, 777-го, 778-го, 779-го, 780-го, 781-го, 782-го, 783-го, 784-го, 785-го, 786-го, 787-го, 788-го, 789-го, 790-го, 791-го, 792-го, 793-го, 794-го, 795-го, 796-го, 797-го, 798-го, 799-го, 800-го, 801-го, 802-го, 803-го, 804-го, 805-го, 806-го, 807-го, 808-го, 809-го, 810-го, 811-го, 812-го, 813-го, 814-го, 815-го, 816-го, 817-го, 818-го, 819-го, 820-го, 821-го, 822-го, 823-го, 824-го, 825-го, 826-го, 827-го, 828-го, 829-го, 830-го, 831-го, 832-го, 833-го, 834-го, 835-го, 836-го, 837-го, 838-го, 839-го, 840-го, 841-го, 842-го, 843-го, 844-го, 845-го, 846-го, 847-го, 848-го, 849-го, 850-го, 851-го, 852-го, 853-го, 854-го, 855-го, 856-го, 857-го, 858-го, 859-го, 860-го, 861-го, 862-го, 863-го, 864-го, 865-го, 866-го, 867-го, 868-го, 869-го, 870-го, 871-го, 872-го, 873-го, 874-го, 875-го, 876-го, 877-го, 878-го, 879-го, 880-го, 881-го, 882-го, 883-го, 884-го, 885-го, 886-го, 887-го, 888-го, 889-го, 890-го, 891-го, 892-го, 893-го, 894-го, 895-го, 896-го, 897-го, 898-го, 899-го, 900-го, 901-го, 902-го, 903-го, 904-го, 905-го, 906-го, 907-го, 908-го, 909-го, 910-го, 911-го, 912-го, 913-го, 914-го, 915-го, 916-го, 917-го, 918-го, 919-го, 920-го, 921-го, 922-го, 923-го, 924-го, 925-го, 926-го, 927-го, 928-го, 929-го, 930-го, 931-го, 932-го, 933-го, 934-го, 935-го, 936-го, 937-го, 938-го, 939-го, 940-го, 941-го, 942-го, 943-го, 944-го, 945-го, 946-го, 947-го, 948-го, 949-го, 950-го, 951-го, 952-го, 953-го, 954-го, 955-го, 956-го, 957-го, 958-го, 959-го, 960-го, 961-го, 962-го, 963-го, 964-го, 965-го, 966-го, 967-го, 968-го, 969-го, 970-го, 971-го, 972-го, 973-го, 974-го, 975-го, 976-го, 977-го, 978-го, 979-го, 980-го, 981-го, 982-го, 983-го, 984-го, 985-го, 986-го, 987-го, 988-го, 989-го, 990-го, 991-го, 992-го, 993-го, 994-го, 995-го, 996-го, 997-го, 998-го, 999-го, 1000-го.

Рис. 3. Почтовая открытка В. А. Соколова С. И. Романовскому  
 Fig. 3. V. A. Sokolov's postcard to S. I. Romanovsky

**Заключение**

Читатель сделает свои выводы из прочитанного. Мы же акцентируем внимание на двух моментах.

**О личных архивах видных ученых.** Это богатый источник информации о побудительных мотивах, руководящих принципах и психологии творчества, представляющих важную часть истории науки. Каждый такой архив в систематизированном виде заслуживает публикации. Сегодня это возможно на доступных электронных носителях.

**О самом остром аспекте дискуссии.** «...Геология исторически складывалась как наука эмпирическая, опиравшаяся на региональный материал, но тем не менее развивалась благодаря не региональным достижениям, а теоретическим. Только вклад в теоретическую компоненту науки дает жизнь ученому в истории науки, и только эта жизнь, в свою очередь, дает право на написание его биографии

в такой широковещательной серии, как издаваемая «Наукой». Ведь в каждом регионе есть свои первопроходцы, открыватели, основатели и прочие корифеи. О них пишут в краеведческих изданиях, в сериях «Люби и знай свой край» и т. п.» Мысль сформулирована изящно и кажется убедительной, но лишь на первый взгляд. Геология остается эмпирической наукой, опирающейся на региональный материал. В разделах, трактующих структуры первых порядков (геодинамика, региональный прогноз месторождений полезных ископаемых...), она будет такой всегда в силу уникальности изучаемых феноменов. На пути к объемлющей теории геология достигает более или менее удачных эмпирических обобщений, но теоретического уровня – лишь там, где в полной мере применима физика и химия (кристаллография, минералогия и пр.). Таким образом, о региональных геологах писать надо. Именно они кропотливо готовят очередную «теоретическую компоненту науки», удачно сформулировать

которую удается кому-то одному. В этом деле отдадим должное Институту геологии Карельского научного центра РАН, издающему серию брошюр о ветеранах карельской геологии.

## Литература

*Романовский С. И.* Николай Алексеевич Головкинский (1834–1897). Л.: Наука, 1979. 191 с.

*Романовский С. И.* Александр Петрович Карпинский (1847–1936). Л.: Наука, 1981. 484 с.

*Романовский С. И.* А. П. Карпинский в Петербурге – Петрограде – Ленинграде. Л.: Лениздат, 1987. 256 с.

*Романовский С. И.* Великие геологические открытия. СПб.: ВСЕГЕИ, 1995. 216 с. (Изд. 2-е, 2005. 224 с.)

*Романовский С. И.* Леонид Иванович Лутугин (1864–1915). СПб.: Наука, 1997. 191 с.

*Романовский С. И.* Наука под гнетом российской истории. СПб.: СПбГУ, 1999. 344 с.

*Романовский С. И.* Нетерпение мысли, или Исторический портрет радикальной русской интеллигенции. СПб.: СПбГУ, 2000. 368 с.

## References

*Romanovsky S. I.* Nikolai Alekseevich Golovkinsky. 1834–1897. Leningrad: Nauka, 1979. 191 p.

*Romanovsky S. I.* Alexandr Petrovich Karpinsky. 1847–1936. Leningrad: Nauka, 1981. 484 p.

*Romanovsky S. I.* A. P. Karpinsky v Peterburge – Petrograde – Leningrade [A. P. Karpinsky in Petersburg – Petrograd – Leningrad]. Leningrad: Lenizdat, 1987. 256 p.

*Romanovsky S. I.* Velikie geologicheskie otkrytiya [Great geological discoveries]. St. Petersburg: VSEGEI, 1995. 216 p. (2<sup>nd</sup> ed., 2005. 224 p.)

*Romanovsky S. I.* Leonid Ivanovich Lutugin. 1864–1915. St. Petersburg: Nauka, 1997. 191 p.

*Romanovsky S. I.* Nauka pod gnetom rossiiskoi istorii [Science under the yoke of Russian history]. St. Petersburg: SPbGU, 1999. 344 p.

*Romanovsky S. I.* Neterpenie mysli, ili istoricheskii portret radikal'noi russkoi intelligentsii [Impatience of thought, or a historical portrait of the radical Russian intelligentsia]. St. Petersburg: SPbGU, 2000. 368 p.

*Romanovsky S. I.* Ot kazhdogo – po talantu, kazhdomu – po sud'be [From each – according to talent, to each – according to fate]. St. Petersburg: SPbGU, 2003. 388 p.

*Romanovsky S. I.* "Pritashchennaya" nauka ['Fitted' science]. St. Petersburg: SPbGU, 2004. 346 p.

*Романовский С. И.* От каждого – по таланту, каждому – по судьбе. СПб.: СПбГУ, 2003. 388 с.

*Романовский С. И.* «Притащенная» наука. СПб.: СПбГУ, 2004. 346 с.

*Соколов В. А.* Человек, влюбленный в камни. Рассказ о жизни и деятельности профессора Петра Алексеевича Борисова. Петрозаводск: Карелия, 1972. 106 с.

*Соколов В. А.* Создатель школы карельских геологов. Очерк о жизни и деятельности профессора А. А. Иностранцева. Петрозаводск: Карелия, 1976. 144 с.

*Соколов В. А.* П. А. Пузыревский – исследователь геологии в Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1977. 64 с.

*Соколов В. А.* Александр Александрович Иностранцев. 1843–1919. М.: Наука, 1981. 103 с.

*Соколов В. А.* Владимир Максимилианович Тимофеев. 1884–1935. Л.: Наука, 1984. 123 с.

*Соколов В. А., Кударенко В. Г.* Академик Ф. Ю. Левинсон-Лессинг в Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1981. 80 с.

*Соколов В. А., Эрте Г. А.* Академик Г. П. Гельмерсен в Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1984. 64 с.

*Поступила в редакцию 03.08.2020*

*Sokolov V. A.* Chelovek, vlyublenniy v kamni. Ras-skaz o zhizni i deyatel'nosti professora Petra Alekseevi-cha Borisova [A man in love with stones. A story about the life and work of Professor Petr Alekseevich Borisov]. Petrozavodsk: Karelia, 1972. 106 p.

*Sokolov V. A.* Sozdatel' shkoly karel'skikh geologov. Ocherk o zhizni i deyatel'nosti professora A. A. Inostrantseva [Founder of the school of Karelian geologists. Es-say on the life and work of Professor A. A. Inostrantsev]. Petrozavodsk: Karelia, 1976. 144 p.

*Sokolov V. A.* P. A. Puzyrevskii – issledovatel' geologii v Karelii [P. A. Puzyrevsky – researcher of geology in Karelia]. Petrozavodsk: Karelia, 1977. 64 p.

*Sokolov V. A.* Alexandr Alexandrovich Inostrantsev. 1843–1919. Moscow: Nauka, 1981. 103 p.

*Sokolov V. A.* Vladimir Maksimilianovich Timofeev. 1884–1935. Leningrad: Nauka, 1984. 123 p.

*Sokolov V. A., Kudarenko V. G.* Akademik F. Yu. Levinson-Lessing v Karelii [Academician F. Yu. Levinson-Lessing in Karelia]. Petrozavodsk: Karelia, 1981. 80 p.

*Sokolov V. A., Erte G. A.* Akademik G. P. Gel'mersen v Karelii [Academician G. P. Gelmersen in Karelia]. Petrozavodsk: Karelia, 1984. 64 p.

*Received August 03, 2020*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:****Войтеховский Юрий Леонидович**

профессор каф. минералогии, кристаллографии  
и петрографии, д. г.-м. н.

Санкт-Петербургский горный университет

вице-президент и председатель Комиссии по истории

Российское минералогическое общество

21 линия В. О., 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106

эл. почта: Voytekhovskiy\_YuL@pers.spmi.ru,

woyt@geoksc.apatity.ru

тел.: +79216679895

**CONTRIBUTOR:****Voytekhovsky, Yury**

Saint Petersburg Mining University

Russian Mineralogical Society

2, 21<sup>st</sup> Line, V. O., 199106 Saint Petersburg, Russia

e-mail: Voytekhovskiy\_YuL@pers.spmi.ru,

woyt@geoksc.apatity.ru

tel.: +79216679895

## ЮБИЛЕИ И ДАТЫ

### ЮРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ ВОЙТЕХОВСКИЙ (к 60-летию со дня рождения)



27 октября 2020 г. исполняется 60 лет нашему коллеге Юрию Леонидовичу Войтеховскому, российскому геологу, минералогу, кристаллографу, математику и историку науки, члену редколлегии серии «Геология докем-

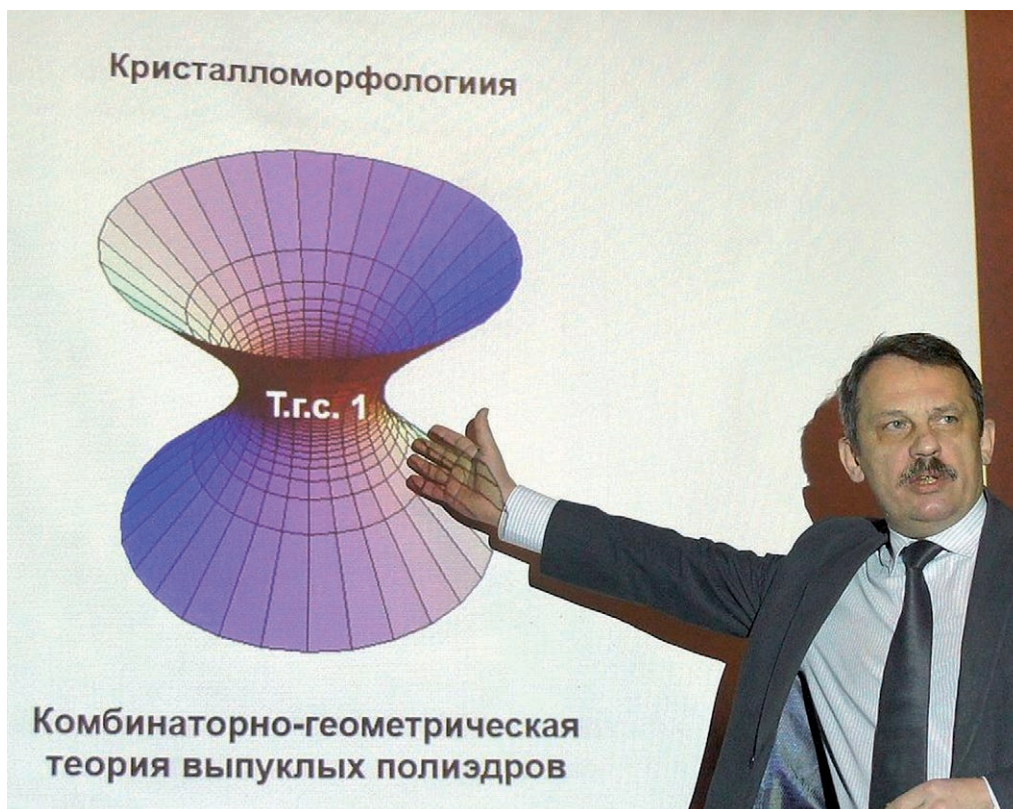
брия» журнала «Труды Карельского научного центра РАН».

Юрий Леонидович родился в поселке Лынтупа Поставского района Витебской области Белорусской ССР. В 1982 году окончил геологоразведочный факультет Ленинградского горного института, специальность «геологическая съемка, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых». В 1994 году завершил обучение на математико-механическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета, специальность «математика», специализация «высшая алгебра и теория чисел». В 1996–1997 годах прошел стажировку в Высшей национальной горной школе Парижа во Франции, получил международный диплом по специальности «геостатистика». После окончания Горного института был направлен на работу в Геологический институт Кольского филиала АН СССР (ныне КНЦ РАН), где последовательно занимал все научные должности от ст. лаборанта до гл. научного сотрудника, а далее зам. директора по научной работе и директора Геологического института (2007–2017). В 2015–2017 годах он по совместительству исполнял обязанности председателя Кольского научного центра РАН.

На Кольском полуострове начал заниматься исследованиями геологии и минералогии медно-никелевых руд месторождения Карикъявр. В 1987 году стал кандидатом геолого-минералогических наук, защитив диссертацию по теме «Геология и вещественный состав руд месторождения Карикъявр». Обучался в докторантуре Института геологии Коми НЦ УрО РАН, его консультантом был академик Н. П. Юшкин.







*Лекция Ю. Л. Войтеховского*

сторождений Кольского п-ова, главным образом кианитовых и медно-никелевых с платинидами и 2) комбинаторная теория фуллеренов и ее приложения к минеральным и биологическим структурам, фундаментальная теория кристаллической горной породы, применение категорий толерантности и порядка к общему определению системы минеральных видов.

Все предшествующие события создали фундамент, на котором возникли главные научные направления исследований на стыке естественных и математических наук. Он является создателем следующих новых научных направлений: систематический комбинаторно-геометрический анализ полиэдрических структур, в том числе фуллеренов и их аналогов; 2) систематический комбинаторно-геометрический анализ реальных кристаллографических простых форм в связи с принципом диссимметрии П. Кюри; структурный анализ кристаллической горной породы как пространства с различными топологиями и неевклидовыми метриками.

В 1993 г. на конгрессе Международной ассоциации математической геологии он награжден серебряной медалью Й. Тойрера за математические исследования петрографических структур. В 2003 г. избран председателем Кольского отделения РМО. По его инициативе и под его руководством с 2004 года в г. Апатиты



*Профессор Ю. Л. Войтеховский, зав. кафедрой минералогии, кристаллографии и петрографии Санкт-Петербургского горного университета*

проводились ежегодные Всероссийские Фермановские научные сессии, с 2005 года – ежегодные Всероссийские научные школы «Математические исследования в кристаллографии, минералогии и петрографии».

Нерядовым событием был выпуск научно-популярного и информационного журнала «Тиетта» Геологического института КНЦ РАН и Кольского отделения РМО, уже известного всей геологической общественности страны (40 превосходных номеров, выпущенных на энтузиазме главного редактора Войтеховского). Как популяризатор науки Юрий Леонидович, почетный член РМО, дважды побеждал в конкурсах научно-популярных статей РФФИ.

Мы говорим о Ю. Л. Войтеховском как о видном ученом и организаторе науки нашей стра-

ны. Здесь хотелось бы упомянуть, что Юрий Леонидович активно участвует в ежегодных семинарах по технологической минералогии и работе Комиссии РМО по технологической минералогии в качестве члена бюро этой комиссии. Он же является председателем Комиссии по истории РМО. Нельзя обойти вниманием его работу в журнале «Труды КарНЦ РАН», о чем было упомянуто выше. В настоящем номере публикуется его статья в разделе «История науки».

Желаем Юрию Леонидовичу доброго здоровья и успехов в творческой деятельности!

*Редколлегия серии «Геология докембрия»  
журнала «Труды Карельского научного  
центра РАН»*

## **ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ**

(требования к работам, представляемым к публикации  
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук»)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершённых оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, потери науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учётом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил ее оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылаются электронная версия анкеты и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед опубликованием авторам высылаются распечатанная версия статьи, которая вычитывается, подписывается авторами и возвращается в редакцию.

Журнал имеет полноценную электронную версию на базе Open Journal System (OJS), позволяющую перевести предоставление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегиями серий и рецензентами в электронный формат и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (<http://journals.krc.karelia.ru/>).

Редакционный совет журнала «Труды Карельского научного центра РАН» (Труды КарНЦ РАН) определил для себя в качестве одного из приоритетов полную открытость издания. Это означает, что пользователям на условиях свободного доступа разрешается: читать, скачивать, копировать, распространять, печатать, искать или находить полные тексты статей журнала по ссылке без предварительного разрешения от издателя и автора. Учредители журнала берут на себя все расходы по редакционно-издательской подготовке статей и их опубликованию.

Содержание номеров Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные варианты статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Почтовый адрес редакции: 185000, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

### **ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ**

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отредактированы авторами.

Объём рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объём рисунков не должен превышать 1/4 объёма статьи. Рукописи большего объёма (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word на сайте <http://journals.krc.karelia.ru> либо на e-mail: [trudy@krc.karelia.ru](mailto:trudy@krc.karelia.ru) или представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502).

## ОБЩИЙ ПОРЯДОК РАСПОЛОЖЕНИЯ ЧАСТЕЙ СТАТЬИ

Элементы статьи должны располагаться в следующем порядке: *УДК* курсивом на первой странице, в левом верхнем углу; заглавие статьи на русском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; инициалы, фамилии всех авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название организации – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов учреждениям, в которых они работают; если все авторы статьи работают в одном учреждении, можно не указывать место работы каждого автора отдельно); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; инициалы, фамилии всех авторов на английском языке полужирным шрифтом; название статьи на английском языке заглавными буквами полужирным шрифтом; аннотация на английском языке; ключевые слова на английском языке; текст статьи (статья экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение. Материалы и методы. Результаты и обсуждение. Выводы** либо **Заключение**); благодарности и указание источников финансирования выполненных исследований; списки литературы: с библиографическими описаниями на языке и алфавите оригинала (**Литература**) и транслитерированный в латиницу с переводом русскоязычных источников на английский язык (**References**); двуязычные таблицы (на русском и английском языках); рисунки; подписи к рисункам на русском и английском языках.

Сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; полный почтовый адрес каждой организации (с указанием почтового индекса) на русском и английском языке; должности, ученые звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты каждого автора; телефон для контактов с авторами статьи (можно один на всех авторов).

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать содержание статьи\* и состоять из 8–10 значимых слов.

АННОТАЦИЯ должна быть лишена вводных фраз, создавать возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (не менее 5). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце фразы ставится точка. Слова, фигурирующие в заголовке статьи, ключевыми являться не могут.

Раздел «Материалы и методы» должен содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

Изложение результатов должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. Следует ссылаться на табличный и иллюстративный материал так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т. д.), фотографии, помещаемые на вкладышах (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо начальным словом библиографического описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. Заголовки таблиц, заголовки и содержание столбцов, строк, а также примечания приводятся на русском и английском языках. На полях бумажного экземпляра рукописи (слева) карандашом указываются места расположения таблиц при первом упоминании их в тексте. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации (при соблюдении вышеуказанных параметров страницы).

РИСУНКИ при первичной подаче материала в редакцию вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки должны быть представлены в виде отдельных файлов в формате TIF (\*.TIF) или JPG. Графические материалы должны быть снабжены распечатками с указанием желательного размера рисунка, пожеланий и требований к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, элек-

\* Названия видов приводятся на латинском языке КУРСИВОМ, в скобках указываются высшие таксоны (семейства), к которым относятся объекты исследования.

тронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Крупномасштабные карты желательно приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с мелкомасштабной картой, где был бы указан участок, увеличенный в крупном масштабе в виде основной карты.

**ПОДПИСИ К РИСУНКАМ** приводятся на русском и английском языках, должны содержать достаточно полную информацию, для того чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях, детали на рисунках следует обозначать цифрами или буквами, значение которых также приводится в подписях.

**ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ.** В расширенных латинских названиях таксонов не ставится запятая между фамилией авторов и годом, чтобы была понятна разница между полным названием таксона и ссылкой на публикацию в списке литературы. Названия таксонов рода и вида печатаются курсивом. Вписывать латинские названия в текст от руки недопустимо. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желательно с годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L., 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоного моллюска *Margarites groenlandicis* (Gmelin, 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

**СОКРАЩЕНИЯ.** Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

**БЛАГОДАРНОСТИ.** В этой рубрике выражается признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и фондам, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи, а также указываются источники финансирования работы.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.** Пристатейные ссылки и/или списки пристатейной литературы следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления ([http://www.bookchamber.ru/GOST\\_P\\_7.0.5.-2008](http://www.bookchamber.ru/GOST_P_7.0.5.-2008)). Список работ представляется в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами ставится пробел.

**ТРАНСЛИТЕРИРОВАННЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES).** Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. Библиографические описания русскоязычных работ даются в латинской транслитерации, рядом в квадратных скобках помещается их перевод на английский язык. Выходные данные приводятся на английском языке (допускается транслитерация названия издательства). При наличии переводной версии источника можно указать ее. Описания прочих работ приводятся на языке оригинала. Для составления списка рекомендуется использование бесплатных онлайн-сервисов транслитерации, вариант BSI.

Внимание! С 2015 года каждой статье, публикуемой в «Трудах Карельского научного центра РАН», редакцией присваивается уникальный идентификационный номер цифрового объекта (DOI) и статья включается в базу данных Crossref. **Обязательным условием является указание в списках литературы DOI для тех работ, у которых он есть.**

## **ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ**

УДК 631.53.027.32:635.63

### **ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ПРЕДПОСЕВНОГО ЗАКАЛИВАНИЯ СЕМЯН НА ХОЛОДОУСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА**

**Е. Г. Шерудило<sup>1</sup>, М. И. Сысоева<sup>1</sup>, Г. Н. Алексейчук<sup>2</sup>, Е. Ф. Марковская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт биологии Карельского научного центра РАН

<sup>2</sup>Институт экспериментальной ботаники НАН Республики Беларусь им. В. Ф. Купревича

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: *Cucumis sativus* L.; кратковременное снижение температуры; устойчивость.

**E. G. Sherudilo, M. I. Sysoeva, G. N. Alekseichuk, E. F. Markovskaya. EFFECTS OF DIFFERENT REGIMES OF SEED HARDENING ON COLD RESISTANCE IN CUCUMBER PLANTS**

Аннотация на английском языке

Keywords: *Cucumis sativus* L.; temperature drop; resistance.

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ**

Таблица 2. Ультраструктура клеток мезофилла листа в последствии 10-минутного охлаждения (2 °С) проростков или корней пшеницы

Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

Показатель Index	Контроль Control	Охлаждение проростков Seedling chilling	Охлаждение корней Root chilling
Площадь среза хлоропласта, мкм <sup>2</sup> Chloroplast cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм <sup>2</sup> Mitochondria cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм <sup>2</sup> Peroxisome cross-sectional area, μm <sup>2</sup>	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1
Число хлоропластов на срезе клетки, шт. Number of chloroplasts in cell cross-section	9 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число митохондрий на срезе клетки, шт. Number of mitochondria in cell cross-section	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число пероксисом на срезе клетки, шт. Number of peroxisomes in cell cross-section	2 ± 0,3	2 ± 0,3	3 ± 0,4

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.

Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ**

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

Fig. 1. Woodboring beetle *Hadrobregmus confuses* Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

(а) – электронная микрофотография кварца; (б) – картина микродифракции, полученная для участка 1 в области кристаллитов; (в) – картина микродифракции, отвечающая участку 2 в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from Duldurga:

(а) – electron microphotograph of the quartz sample; (б) – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; (в) – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ**

Ссылки на книги

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

References:

Vol'f G. N. Dispersiya opticheskogo vrashheniya i krugovoj dikhroizm v organicheskoy khimii [Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry]. Ed. G. Snattske. Moscow: Mir, 1970. P. 348–350.

Patrushev L. I. Ekspressiya genov [Gene expression]. Moscow: Nauka, 2000. 830 p.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. Eds P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журн. общ. биол. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione // Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi:10.1199/tab.0142

References:

Viktorov G. A. Mezhhvidovaya konkurentsiya i sosushhestvovanie ehkologicheskikh gomologov u paraziticheskikh pereponchatokrylykh [Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera]. Zhurn. obshh. biol. [Biol. Bull. Reviews]. 1970. Vol. 31, no. 2. P. 247–255.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Noctor G., Queval G., Mhamdi A., Chaouch A., Foyer C. H. Glutathione. Arabidopsis Book. American Society of plant Biologists, Rockville, MD. 2011. doi: 10.1199/tab.0142

Ссылки на материалы конференций

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

References:

Mar'inskikh D. M. Razrabotka landshaftnogo plana kak neobkhodimoe uslovie ustoichivogo razvitiya goroda (na primere Tyumeni) [Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen)]. Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: Tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) [Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)]. Novosibirsk, 2000. P. 125–128.

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... докт. хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

References:

Sheftel' B. I. Ekologicheskie aspekty prostranstvenno-vremennykh mezhvidovykh vzaimootnoshenii zemlerоек Srednei Sibiri [Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow, 1985. 23 p.

Lozovik P. A. Hidrogeokhimicheskie kriterii sostoyaniya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony i ikh ustoichivosti k antropogennomu vozdeistviyu [Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact]: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk, 2006. 481 p.

Ссылки на патенты

Патент РФ № 2000130511/28.04.12.2000.

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат // Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

References:

Patent RF № 2000130511/28. 04.12.2000 [Russian patent No. 2000130511/28. December 4, 2000].

Es'kov D. N., Seregin A. G. Optiko-elektronnyi apparat [Optoelectronic apparatus]. Patent Rossii № 2122745 [Russian patent No. 2122745]. 1998. Bulletin No. 33.

Ссылки на архивные материалы

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

References:

Grebenshchikov Ya. P. K nebol'shomu kursu po bibliografii: materialy i zametki, 26 fevr. – 10 marta 1924 g. [Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924]. OR RNB. F. 41. St. un. 45. L. 1–10.

Ссылки на интернет-ресурсы

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.12.2015).

Демография. Официальная статистика / Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 25.12.2015).



References:

*Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. Sistema Sotsionet kak platforma dlya razrabotki nauchnykh informatsionnykh resursov i onlainovykh servisov [Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services]. Elektron. b-ki [Digital library]. 2003. Vol. 6, iss. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).*

*Demografija. Oficial'naja statistika [Demography. Official statistics]. Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki [Federal state statistics service]. URL: <http://www.gks.ru/> (accessed: 25.12.2015).*

Ссылки на электронные ресурсы на CD-ROM

Государственная Дума, 1999–2003 [Электронный ресурс]: электронная энциклопедия / Аппарат Гос. Думы Федер. Собрания Рос. Федерации. М., 2004. 1 CD-ROM.

References:

*Gosudarstvennaya Duma, 1999–2003 [State Duma, 1999–2003]. Electronic encyclopedia. The office of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation. Moscow, 2004. 1 CD-ROM.*



**Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences**

**No. 10, 2020**

**“PRECAMBRIAN GEOLOGY”**

**TABLE OF CONTENTS**

V. V. Shchiptsov, T. P. Bubnova, E. N. Svetova, L. S. Skamnitskaya. QUARTZ RAW MATERIALS OF THE KARELIAN-KOLA REGION: MAJOR RESEARCH RESULTS. . . . .	5
O. I. Volodichev, T. I. Kuzenko, O. A. Maksimov. GEOLOGY AND PETROLOGY OF ZOISITITES FROM THE GRIDINO ECLOGITE-BEARING COMPLEX, BELOMORIAN PROVINCE, FENNOSCANDIAN SHIELD . . . . .	26
N. S. Ulyasheva. GEOCHEMISTRY OF AMPHIBOLITES OF THE KHARBAY METAMORPHIC COMPLEX (POLAR URALS). . . . .	49
E. E. Klimovskaya. CARBON AND OXYGEN ISOTOPE COMPOSITION OF CARBONATES IN METAKOMATIITES OF THE KOSTOMUKSHA GREENSTONE STRUCTURE . . . . .	60
D. S. Rybakov. THE INFLUENCE OF PALEOPROTEROZOIC FORMATIONS OF THE ONEGA STRUCTURE ON GEOCHEMICAL FEATURES OF ZAONEZHYE SOILS . . . . .	72
V. A. Shekov, A. A. Ivanov, S. A. Krylova. DIGITAL OUTCROP MODEL AS A MODERN METHOD OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT RESEARCH: THE EXAMPLE OF PRECAMBRIAN COMPLEXES IN LAHDENPOHSKY DISTRICT . . . . .	84
HISTORY OF SCIENCE	
Yu. L. Voytekhovskiy. OF SCIENTIFIC BIOGRAPHIES OF GEOLOGISTS: CORRESPONDENCE BETWEEN S. I. ROMANOVSKY AND V. A. SOKOLOV . . . . .	99
DATES AND ANNIVERSARIES	
Yury L. Voytekhovskiy (on the 60 <sup>th</sup> anniversary) . . . . .	112
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS . . . . .	116

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра  
Российской академии наук**  
№ 10, 2020

ГЕОЛОГИЯ ДОКЕМБРИЯ

*Печатается по решению Ученого совета  
Федерального исследовательского центра  
«Карельский научный центр Российской академии наук»*

Выходит 12 раз в год

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций  
Регистрационная запись ПИ № ФС 77-72429 от 28.02.2018 г.

Редактор А. И. Мокеева  
Компьютерная верстка Г. О. Предтеченский

Подписано в печать 21.10.2020. Дата выхода 31.10.2020. Формат 60x84<sup>1/8</sup>.  
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 13,7. Усл. печ. л. 14,4.  
Тираж 120 экз. Заказ 625. Цена свободная

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук»  
185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

Оригинал-макет: Редакция научного издания «Труды КарНЦ РАН»

Типография: Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН  
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50