

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр
Российской академии наук»



ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 10, 2021

Серия ГЕОЛОГИЯ ДОКЕМБРИЯ

Петрозаводск
2021

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.; В. В. КОВАЛЕВСКИЙ, д. г.-м. н.; А. Б. КУЗНЕЦОВ, член-корр. РАН, д. г.-м. н.; В. С. КУЛИКОВ, д. г.-м. н.; Ю. А. МОРОЗОВ, член-корр. РАН, д. г.-м. н.; А. В. ПЕРВУНИНА, 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.; Е. Н. СВЕТОВА (ответственный секретарь), к. г.-м. н.; 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

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, 2021

PRECAMBRIAN GEOLOGY Series

Petrozavodsk
2021

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.); A. B. KUZNETSOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geol.-Miner.); Yu. A. MOROZOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geol.-Miner.); A. V. PERVUNINA, 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.; E. N. SVETOVA (Executive Secretary), PhD (Geol.-Miner.); O. I. VOLODICHEV, DSc (Geol.-Miner.); Yu. L. VOYTEKHOVSKY, 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

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

УДК 551.24

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ДАЙКИ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ФУНДАМЕНТЕ: ЭКРАНИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ КОНТАКТА ФУНДАМЕНТ-ЧЕХОЛ

А. Л. Кулаковский

Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

Рассмотрены вопросы, связанные с образованием пластовых, изначально горизонтально залегающих интрузий основного, ультраосновного и щелочного состава в зоне контакта кристаллического фундамента и осадочных отложений чехла. Определены основные закономерности формирования пластовых интрузий, а также вмещающих их субгоризонтальных зон дробления и/или брекчирования *in situ* в гранитоидах и метаморфитах фундамента в разных регионах, в различных геодинамических обстановках в интервале палеопротерозой-палеоген. Сделан вывод о предполагаемой связи возникновения таких зон дробления и/или брекчирования с волновым процессом: отражением волн упругой деформации от поверхности раздела двух контрастных по физико-механическим свойствам сред (фундамент – чехол) с появлением в фундаменте стоячих волн, предопределяющих локализацию зон дробления *in situ* при сбросе напряжений (тектоно-кессонный эффект).

Ключевые слова: система «фундамент – чехол»; пластовые интрузии; горизонтальные дайки; зоны дробления и/или брекчирования *in situ*; тектоно-кессонный эффект; стоячие волны.

A. L. Kulakovskiy. HORIZONTAL DIKES IN A CRYSTALLINE BASEMENT: SHIELDING EFFECT OF THE BASEMENT-COVER CONTACT

Issues related to the formation of sheetlike, initially horizontally bedded intrusions of basic, ultrabasic and alkaline composition in the contact zone of the crystalline basement and the sedimentary cover are considered. The main patterns in the formation of the sheets, as well as their host subhorizontal *in situ* crushing and/or brecciation zones in basement granitoids and metamorphites were identified for different regions and different geodynamic settings in the Paleoproterozoic-Paleogene interval. A connection was assumed to exist between the appearance of such crushing and/or brecciation zones and the wave process: the reflection of elastic deformation waves from the interface of two media contrasting in physical and mechanical properties (basement-cover) giving rise to standing waves in the basement, which predetermine the localization of *in situ* crushing zones during stress relief (tectonic caisson effect).

Keywords: basement – cover system; sheetlike intrusions; horizontal dikes; *in situ* crushing and/or brecciation zones; tectonic caisson effect; standing waves.

Введение

Одной из особенностей зоны контакта кристаллического фундамента и чехла является формирование в этой зоне пластовых, изначально возникающих как субгоризонтальных, параллельных контакту интрузий основного/ультраосновного или, реже, щелочного состава, суммарный объем которых может иногда достигать колоссальных размеров. Такие интрузии формируются как в низах чехольного комплекса, так и в кристаллическом фундаменте, а также и непосредственно вдоль поверхности контакта чехла и фундамента.

В литературе для таких интрузий, составляющих единый генетический комплекс, используются различные термины. В породах чехла это силлы. Тела, приуроченные строго к поверхности контакта фундамент-чехол, могут быть отнесены к межформационным интрузиям, хотя чаще их также именуют силлами. Сложнее подобрать адекватный термин для исходно субгоризонтально залегающих интрузий в кристаллическом фундаменте. Можно встретить применительно к ним термины «horizontal dikes» (горизонтальные дайки), «sheets» или «sheetlike» intrusions (пластины или пластовые интрузии), «tabular» или «blade-shaped» intrusions (листообразные интрузии), а иногда и «силлы» или «силлоподобные тела». Далее в тексте для подобных интрузий в кристаллическом фундаменте используются наиболее обычные в англоязычной литературе термины – «горизонтальные дайки» или «пластины» (пластовые интрузии).

Основные закономерности строения и истории становления подобных комплексов пластовых интрузий в зонах контакта фундамент-чехол можно понять, анализируя данные по наиболее изученным из таких объектов. При этом особый интерес представляет проблема деформационной обстановки формирования этого комплекса пластовых интрузий. Строго говоря, данная проблема, как и проблема становления вообще любой интрузии, предполагает рассмотрение двух в общем случае независимых механизмов: а) механизма возникновения того «объема», который впоследствии будет заполнен магмой (известная «проблема пространства», необходимого для образования интрузивного тела) и б) механизма становления (внедрения) самой интрузии.

Для рассматриваемого комплекса пластовых интрузий важно отметить, что деформационная обстановка их формирования принципиально отличается для силлов в породах чехла (а также силлов по контакту фундамента

и чехла), с одной стороны, и пластовых интрузий в фундаменте, с другой. В первом случае к моменту внедрения магмы уже существовала плоскостная анизотропия (по вертикали) среды, во втором (пластины в породах кристаллического фундамента) подобная анизотропия отсутствовала. Поэтому для силлов в породах чехла (и по поверхности структурного несогласия фундамент-чехол) вопрос о возникновении необходимого для интрузий «объема», т. е. «проблема пространства», практически не стоит: оно (возникновение) предопределено существованием субгоризонтальных поверхностей. А вот для пластовых интрузий в массивных гранитоидах (либо сложноскладчатых метаморфитах) фундамента механизм возникновения субгоризонтальных зон, вмещающих эти интрузии, требует особого рассмотрения.

Горизонтальные дайки (обзор)

Северо-запад Кольского полуострова (район р. Печенга). На северо-западе Кольского п-ова на глубокометаморфизованных породах архея со структурным несогласием залегают слабо- или умереннометаморфизованные терригенные и вулканогенные породы палеопротерозойского (2,3–1,9 млрд лет) печенгского комплекса, выполняющего рифтогенную Печенгскую впадину. На хорошо обнаженной территории к северу от Печенгских тундр и до побережья Баренцева моря широко распространены рои разновозрастных даек преимущественно основного-ультраосновного состава. Только для дорифейского времени здесь выделено [Морозов и др., 2017; Терехов и др., 2019] шесть генераций даек различной ориентировки, отражающих закономерную эволюцию архейско-палеопротерозойских геодинамических обстановок. Дайки одной из генераций (пикрит-долериты β_4 , по: [Морозов и др., 2017]) резко отличаются от всех прочих своим пологим залеганием, фактически это «субгоризонтальные дайки» (пластовые интрузии), секущие субвертикальную расслоенность метаморфитов архейского фундамента под углом, близким к прямому (рис. 1). Эти горизонтальные дайки («прибрежный комплекс» силлоподобных пологозалегающих тел пикродолеритов, по: [Морозов и др., 2017; Терехов и др., 2019]) обычно дифференцированы по составу: внизу – пикриты и коматииты, сверху – оливинсодержащие долериты.

Детальные структурные исследования показали [Морозов и др., 2017], что эти интрузии пикрит-долеритов образуют многоярусную си-

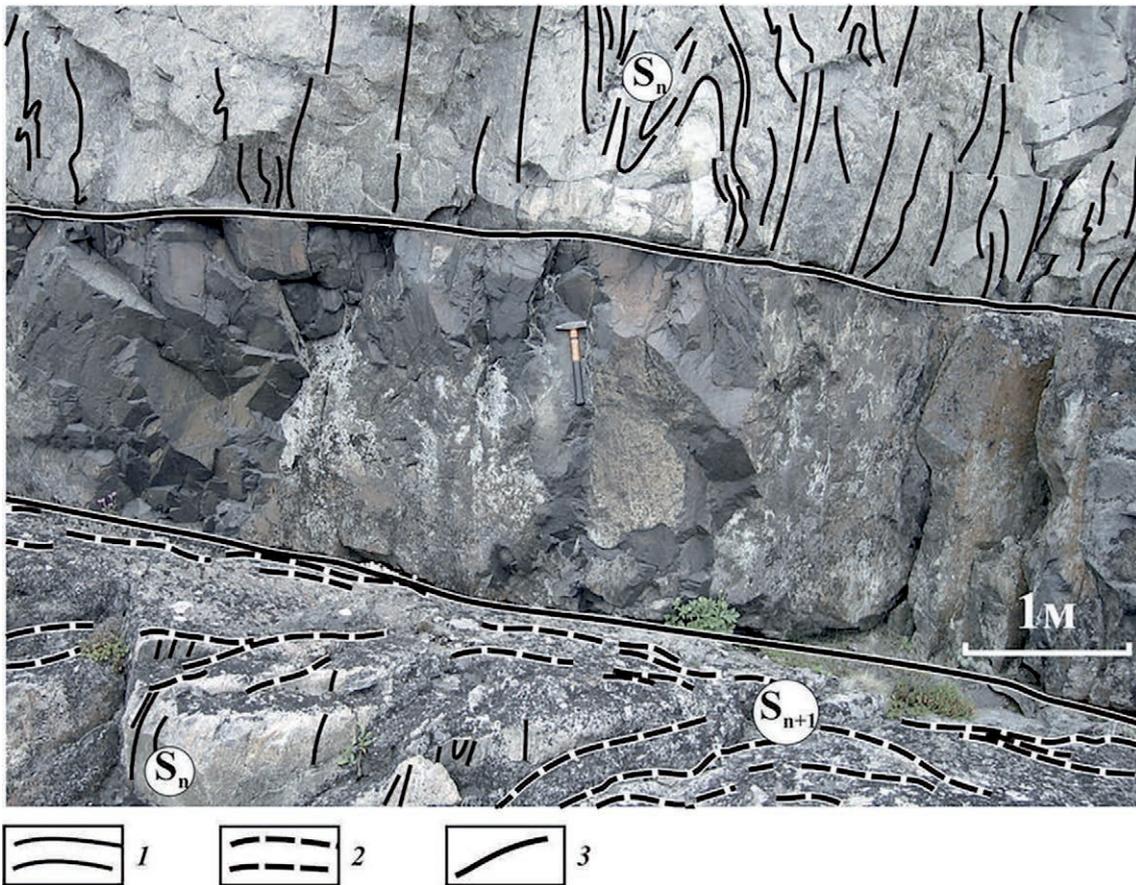


Рис. 1. Субгоризонтальная пластовая интрузия («горизонтальная дайка») пикрит-долеритов в архейских гранито-гнейсах северного обрамления Печенгской структуры (вертикальная стенка, вид на юг):

1 – субвертикальная полосчатость гранито-гнейсов (S_n), 2 – наложенная расслоенность сдвигового течения (S_{n+1}) у нижнего контакта интрузии, 3 – контакты интрузии

Fig. 1. Subhorizontal sheet (“horizontal dike”) of picrite-dolerites in the Archean granite-gneisses of the northern framing of the Pechenga structure (vertical wall, view to the south):

1 – subvertical foliation of granite-gneisses (S_n), 2 – superimposed foliation of the shear current (S_{n+1}) at the bottom contact of the intrusion, 3 – contacts of the intrusion

стему пластин, полого ($10\text{--}35^\circ$) погружающихся преимущественно к югу и юго-западу («под Печенгскую структуру»).

Становление пластовых интрузий пикрит-долеритов в кристаллических породах архея обрамления Печенгского палеорифта рассматривается [Морозов и др., 2017] как синдеформационное относительно формирования пологих надвигов (со сдвиговой компонентой), зафиксированных как в архейских метаморфитах фундамента, так и в породах «палеопротерозойского чехла» – осадочно-вулканогенного печенгского комплекса.

В архейских метаморфитах, подстилающих образования печенгского комплекса, по данным изучения керн Кольской сверхглубокой скважины, эквивалентом даек пикрит-долеритов

северного обрамления Печенгской структуры, возможно, являются многочисленные тела ортоамфиболитов – пород основного-ультраосновного состава. Доля этих раннепротерозойских ортоамфиболитов, судя по составу редкоземельных элементов, среди всех ортоамфиболитов архейской части разреза скважины составляет около 80 % [Ветрин, 2007].

В целом формирование комплекса пластовых (исходно – субгоризонтально залегающих) интрузий основного-ультраосновного состава в архейском фундаменте Печенгской рифтовой структуры и в низах разреза палеопротерозойского печенгского комплекса свидетельствует, как отмечено в [Морозов и др., 2017], о существенной перестройке тектонического режима на рубеже примерно 2,2 млрд лет.

Восточная Финляндия, район Коли (зона контакта архейского фундамента и палеопротерозойских отложений Карельского пояса). Комплекс палеопротерозойских мафит-ультрамафитовых интрузий – карьялиты или GWA (габбро-верлитовая ассоциация) [Vuollo, Piirainen, 1992; Hanski et al., 2010], включающий субгоризонтальные расслоенные интрузии в породах архейского кристаллического фундамента, широко распространен в Восточной и Северной Финляндии. Протяженность этих силлов – от нескольких до 150 км, мощность – 200–400 м.

В районе Коли (Восточная Финляндия) расслоенная субгоризонтально залегающая мафическая интрузия приурочена к зоне контакта архейских тоналитов, гранодиоритов и гранитов (с возрастом 2,9–2,6 млрд лет) с ятулий-

скими (нижнепротерозойскими) кварцитами и аркозами группы Herajärvi (2,3–1,97 млрд лет) [Vuollo, Piirainen, 1992; Sorjonen-Ward, 2006] и локализована частично в гранитоидах фундамента (до глубины около 200 м ниже поверхности контакта), частично – в породах двух нижних горизонтов ятулийского разреза (рис. 2, А). Длина (на поверхности) силла Коли – около 60 км, мощность – 340 м, площадь его оценивается в сотни квадратных километров. Гравитационная расслоенность силла Коли определяется сменой снизу вверх верлитов через клинопироксениты гранофирами. Датировки абсолютного возраста этих интрузивных пород составляют по U-Pb 2170 ± 40 и 2212 ± 30 млн лет [Vuollo, Piirainen, 1992; Hanski et al., 2010].

Пример расслоенного силла Коли (типичного представителя магматизма 2,2 млрд лет

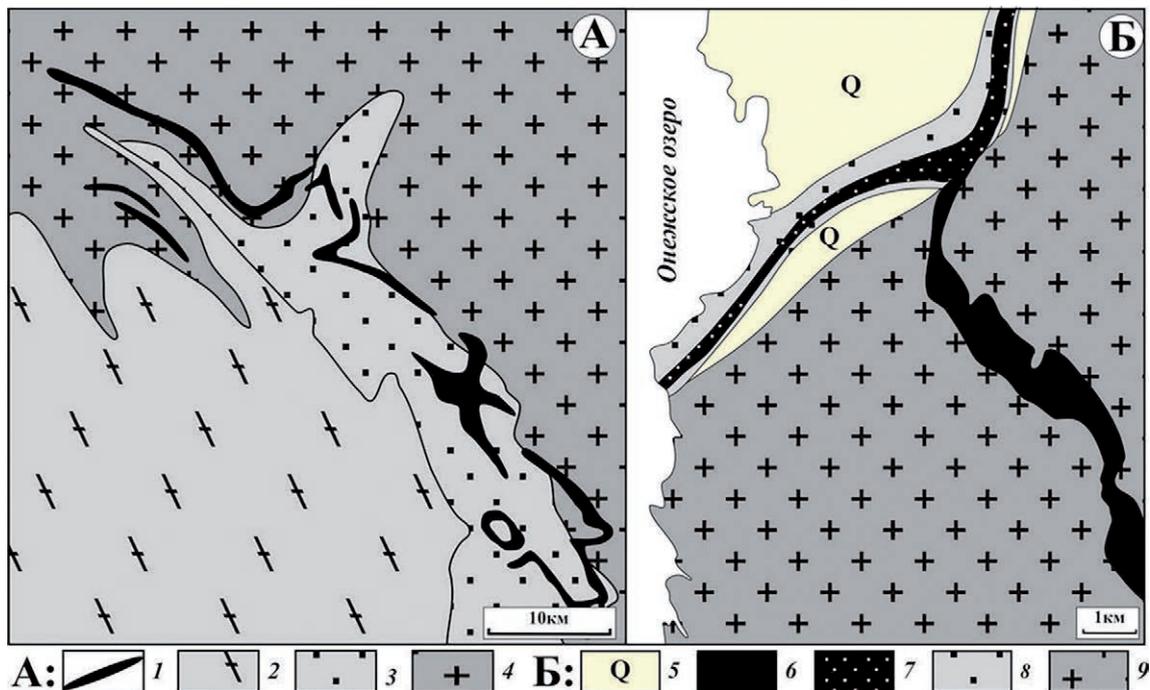


Рис. 2. Субгоризонтальные мафические интрузии (силлы) в кристаллическом фундаменте Фенноскандинавского щита:

А – силл Коли в зоне контакта архейского основания и чехла (Восточная Финляндия): 1 – силл Коли, 2 – калевий (сланцы), 3 – ятулий (кварциты и аркозы Herajärvi Group), 4 – архейские гранитоиды [по: [Sorjonen-Ward, 2006], с изменениями и упрощениями];

Б – силлы в зоне контакта основания и чехла восточного побережья Онежского озера (Карелия): 5 – четвертичные отложения, 6 – Пудожгорский силл, 7 – Габневский силл, 8 – ятулий (доломиты и эффузивы основного состава), 9 – гранитоиды архей/раннего протерозоя [по: Трофимов и др., 2006; Трофимов, Голубев, 2008, с изменениями и упрощениями]

Fig. 2. Subhorizontal mafic intrusions (sills) in the crystalline basement of the Fennoscandian Shield.

А – Koli sill in the contact zone of the Archean basement and cover (Eastern Finland): 1 – Koli sill, 2 – Kalevium (mica schists), 3 – Yatulum (quartzites and arkose of the Herajärvi Group), 4 – Archean granitoids [after: Sorjonen-Ward, 2006, with changes and simplifications];

Б – sills in the contact zone of the basement and cover of the eastern coast of Lake Onega (Karelia): 5 – Quaternary deposits, 6 – Pudozhgorsky sill, 7 – Gabnevsky sill, 8 – Yatulum (dolomites and effusive rocks), 9 – Archean / early Proterozoic granitoids [after: Trofimov et al., 2006; Trofimov, Golubev, 2008, with changes and simplifications]

в восточной и северной частях Фенноскандинавского щита), как считается в [Pekkarinen, Lukkarinen, 1991; Paleoproterozoic..., 2005], указывает, что эти интрузии относятся к единичному магматическому эпизоду, т. е. кристаллизуются от единичной магматической пульсации, производной более примитивной магмы, нежели более молодые магматиты. При этом Nd-изотопные данные свидетельствуют, что магма, ответственная за внедрение интрузий GWA (габбро-верлитовой ассоциации с возрастом 2220 млн лет) в различных районах Северной и Восточной Финляндии, была изотопно однородной. И этот эпизод GWA-магматизма был довольно кратковременным событием – видимо, даже короче, чем разрешающая способность методов датирования [Hanski et al., 2010].

В геодинамическом отношении становление комплекса мафит-ультрамафитовых интрузий карьялитов (GWA), включая силл Коли, относится ко времени достаточно тектонически спокойного режима континентального осадконакопления ятулийских терригенных пород – до начала накопления связанных с рифтингом континентальной окраины турбидитов, граувакк, черных сланцев и BIF калевиа [Laajoki, 2005].

Карелия, Восточное Прионежье, Пудож (Онежская палеопротерозойская структура). На восточном побережье Онежского озера субгоризонтально залегающие пластовые интрузии Пудожгорского долерит-габбродиоритового комплекса (силлы Пудожгорский и Габневский) приурочены, как в Северной и Восточной Финляндии, к зоне контакта кристаллического фундамента и ятулийского палеопротерозойского чехла [Онежская..., 2011]. Фундамент сложен гранитоидами (граниты, плагиограниты и гранито-гнейсы) нерасчлененного комплекса архея – раннего протерозоя. Чехольный комплекс представлен вулканогенно-осадочной толщей ятулия: доломитами и лавами основного состава.

Расположенный целиком в гранитоидах фундамента Пудожгорский силл представляет собой пластовое тело мощностью 100–140 м северо-западного простирания с пологим (средний угол падения 10–15° [Трофимов, Голубев, 2008; Онежская..., 2011]) падением к юго-западу, прослеженным по простиранию на 25 км. На северо-западе Пудожгорский силл смыкается с Габневским силлом, залегающим в карбонатных породах нижнего горизонта ятулийского разреза (рис. 2, Б). На некоторых участках установлена связь силлов с хрупкими разрывными нарушениями вмещающих пород [Онежская..., 2011]. Оба силла, Пудожгорский и Габневский, четко дифференцированы: от долеритов до диоритов и монцогранитов.

Предполагается, что эпизод становления этих силлов протоплатформенной толеит-базальтовой формации относительно непродолжительный – около 40 млн лет [Онежская..., 2011]. И этот кратковременный эпизод «силлогенеза» проявлен на фоне длительного стабильного прогибания Онежской впадины и накопления эпиконтинентальных отложений – времени, не отмеченного какими-либо серьезными внутрiformационными тектоническими событиями.

Центральный Алдан (Ималыкский железорудный район). Очень широко распространены пластовые интрузии в кристаллическом фундаменте и в низах разреза платформенного чехла по северной окраине Алданского щита. В отличие от вышеприведенных примеров здесь эти субгоризонтально залегающие интрузии имеют щелочной состав.

Кристаллический фундамент Центрального Алдана представлен архейскими метаморфитами: гнейсами и кристаллосланцами верхнеалданской и федоровской серий иенгрского комплекса. Платформенный чехол сложен неметаморфизованными терригенными и карбонатными отложениями венда и нижнего кембрия. С мезозойской эпохой активизации связано становление в юре-мелу алданского комплекса щелочных и щелочноземельных интрузий, включающего силлы, дайки, штоки и лакколитоподобные тела щелочных и нефелиновых сиенитов, сиенит-порфиоров, лампроитов, щелочных гранитов [Хомич, Борискина, 2016].

Эти интрузии преимущественно пластовой формы сконцентрированы в значительной степени в зоне контакта фундамент-чехол (рис. 3). Большое количество этих интрузий (мощность которых колеблется в широких пределах – от первых десятков сантиметров до многих десятков метров) в виде силлов залегает в нижней части чехла; многие секут метаморфиты докембрийского цоколя, а некоторые тела (в т. ч. Мурунский массив с уникальным месторождением чароита) приурочены почти точно к поверхности структурного несогласия между фундаментом и чехлом [Петров, 1976, 1978].

Многочисленные субгоризонтальные интрузии сиенитов в докембрийском фундаменте были вскрыты скважинами в ходе разведки железорудных месторождений Ималыкского района. Здесь особый интерес представляет возможность определить природу тектонических зон, к которым в большинстве случаев приурочены пластовые интрузии сиенитов: некоторые из таких зон заполнены сиенитами только на часть своей мощности, а некоторые вообще не содержат сиенитовых тел.

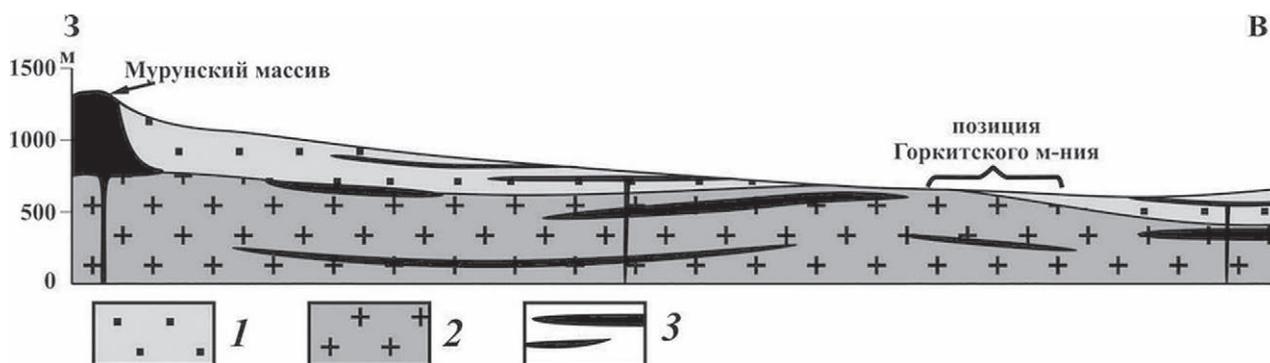


Рис. 3. Схема локализации субгоризонтальных пластовых интрузий сиенитов в зоне контакта фундамент-чехол северной окраины Алданского щита (междуречье Чары и Токко, Ималыкский железорудный район):

1 – отложения платформенного чехла (венд-кембрий), 2 – архейские метаморфиты фундамента, 3 – мезозойские сиениты

Fig. 3. Scheme of localization of subhorizontal sheets of syenites in the contact zone of the basement and cover of the northern margin of the Aldan Shield (interfluve of Chara and Tokko, Imalyk iron ore region):

1 – deposits of platform cover (Vendian – Cambrian), 2 – Archean metamorphic rocks of the basement, 3 – Mesozoic syenites

Сложены подобные (бессиенитовые) тектонические зоны раздробленными, очень сильно дезинтегрированными (обычно до состояния какиритов или тектонического песка) метаморфитами, мощность зон – от первых метров до нескольких десятков метров, ориентированы они субгоризонтально и почти под прямым углом секут субвертикальные пластины докембрийских пород. При этом по данным буровых и геофизических работ установлено отсутствие какого-либо смещения блоков (крыльев) по этим мощным разломным зонам: контрастность разреза докембрийских образований здесь позволяет уверенно проследить отдельные маркирующие пластины метаморфитов над и под этими субгоризонтальными зонами – без признаков смещения (рис. 4, А). Более того, по составу обломков в тектонитах (брекчиях, какиритах, тектоническом песке) этих зон маркирующие пластины (амфиболитов, железистых кварцитов, скарноидов, гнейсов, гранитоидов) можно протрассировать и через сами тектонические зоны [Кулаковский, 1979].

По всей видимости, «сухие», не заполненные магмой субгоризонтальные зоны дробления *in situ* в кристаллическом фундаменте, подобные алданским, сохраняются далеко не везде и нередко наследуются зонами сколовой деформации (и преобразуются в надвиги или сдвига-надвиги) и/или используются интрузивными телами. Однако изредка все-таки подобные «сухие» зоны дробления в массивных, нетекстурированных кристаллических породах могут встречаться.

Подобные зоны дезинтегрированных пород («моро») были описаны в гранитах рапакиви на юго-западе Финляндии [Eskola, 1930].

Раздробленность имеет гравийную размерность. Никаких минеральных и текстурных различий между породами в обломках этих зон и монолитными гранитами нет, как нет и признаков структурно-деформационной анизотропии в породах «моро». Контакты «моро» с недезинтегрированными гранитами резкие, без признаков тектонических подвижек по ним (рис. 4, Б). Тем не менее некоторое количество субгоризонтальных трещин придает породе сланцеватый облик.

Антарктида, Земля Виктории (Сухие долины Мак-Мердо). Это, наверное, наиболее обнаженный и изученный из районов распространения пластовых интрузий в мире.

Кристаллический фундамент на Земле Виктории сложен метаморфитами (кристаллосланцами и гнейсами) позднедокембрийского-кембрийского возраста и массивными гранитоидами (кварцевыми диоритами, кварцевыми монцонитами, гранитами) раннепалеозойского возраста [Hamilton et al., 1965; Muirhead et al., 2012]. Метаморфическая полосчатость ориентирована обычно субвертикально. На плоской, практически горизонтальной поверхности фундамента так же горизонтально залегают почти не деформированные кластические породы (песчаники, алевролиты) супергруппы Veason (девон-пермь), которую, вместе с вышезалегающими нижнеюрскими базальтами Kirkpatrick, рассматривают [Jerram et al., 2010] как эквивалент формации Karoo Южной Африки.

Зона контакта фундамент-чехол насыщена мощными пластовыми интрузиями среднего-основного состава: долеритами, кварцевыми диабазами, габброидами и в незначительном

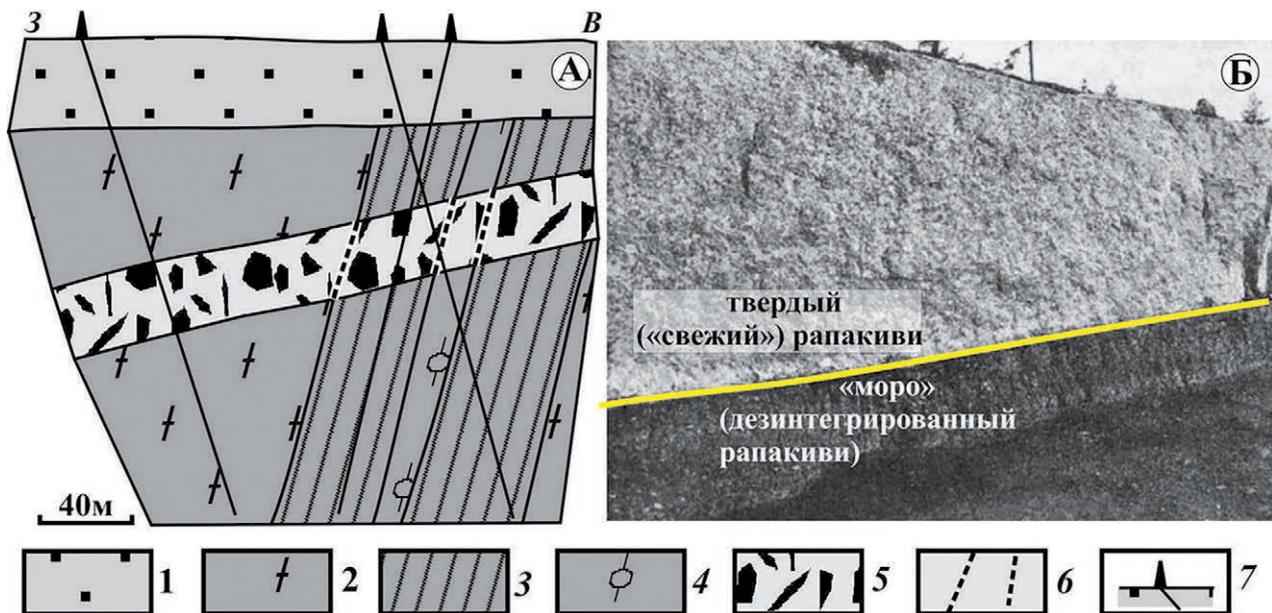


Рис. 4. Пологопадающие зоны дробления *in situ* в кристаллических породах докембрийского фундамента:

А – в разрезе Горкитского месторождения железистых кварцитов Алданского щита (позицию м-ния см. на рис. 3): 1 – терригенные породы венда, 2–4 – докембрийские метаморфиты (2 – гранито-гнейсы, 3 – железистые кварциты, 4 – скарноиды), 5 – тектонические брекчии, какириты, песок, 6 – геологические границы, трассируемые через зону дробления, 7 – буровые скважины;

Б – в гранитах рапакиви Фенноскандинавского щита, Юго-Западная Финляндия, район Laitila (по: [Eskola, 1930], с небольшими изменениями и дополнениями)

Fig. 4. Gently dipping crushing zones *in situ* in crystalline rocks of the Precambrian basement.

A – in the section of the Gorkit BIF deposit of the Aldan Shield (see the position of the deposit in Fig. 3): 1 – Vendian terrigenous rocks, 2–4 – Precambrian metamorphites (2 – granite-gneisses, 3 – iron quartzites, 4 – skarnoids), 5 – tectonic breccias, kakirite, sand, 6 – geological boundaries, traced through the crushing zone, 7 – boreholes.

B – in rapakivi granites of the Fennoscandian Shield, southwestern Finland, Laitila region (after: [Eskola, 1930], with minor changes and additions)

объеме – гранофирами [Hamilnon et al., 1965]. Время внедрения этих интрузий (комплекса Ferrar Dolerite), по K-Ar методу, – средняя юра. Эти силлы, вместе с базальтами Kirkpatrick, а также с диабазами подводющих даек, секущих отложения чехла, составляют огромную по масштабу магматическую систему, становление которой связывают [Jerram et al., 2010] с распадом Гондваны.

В породах чехла интрузии долеритов представляют собой типичные силлы, залегающие горизонтально или с очень малым углом падения, мощностью от 10 до нескольких сотен метров. Примерно по контакту фундамента и чехла, переходя местами на нижние горизонты разреза супергруппы Veason, располагается силл Реперлайн, мощность которого меняется от 200 до 450 м. Близкую мощность имеет и полностью размещенный в породах фундамента силл Basement (рис. 5). Суммарная мощность всех пластин долеритов в разрезах Земли Виктории – около 1 км, а площадь отдельных пластин может достигать по меньшей мере 2,5 тыс. кв. км [Hamilnon et al., 1965].

Расстояние от кровли самой нижней пластины долеритов (Basement sill) до подошвы чехольного комплекса варьирует преимущественно в пределах 150–450 м, иногда уменьшаясь почти до 0 или возрастая до 1000–1200 м. Примечательно, что эта нижняя пластина долеритов залегает почти целиком в массивных гранитоидах фундамента, но не в гнейсах и кристаллосланцах с их субвертикальной полосчатостью. В пластине Basement sill зафиксирована дифференциация по составу [Jerram et al., 2010]: базальты у подошвы пластины переходят вверх через диабазы к габбро (основная часть пластины), а самые верхи интрузии сложены гранофирами и диабазами. На некоторых участках закартированы обогащенные ортопироксеном «языки», отходящие от основного тела нижней пластины (Basement sill).

Юго-запад США (Аризона, Калифорния) и запад Канады (Альберта, Саскачеван). Кристаллический фундамент Северо-Американской платформы на юго-западе США сложен [Howard, 1991] раннепротерозойски-

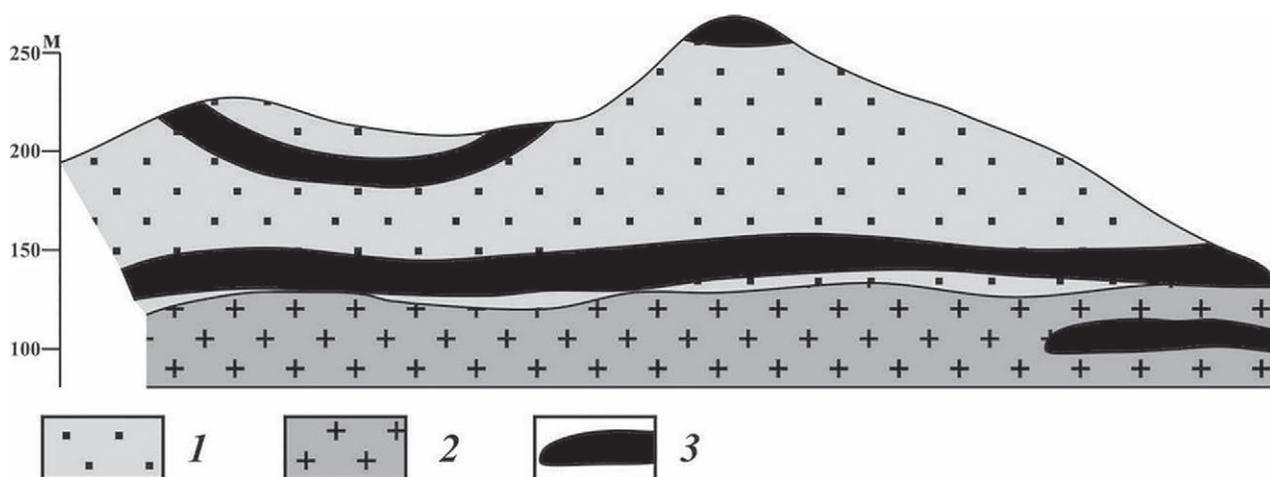


Рис. 5. Субгоризонтальные пластовые мафические интрузии в зоне контакта фундамент-чехол Земли Виктории (Антарктида):

1 – пермские песчаники, алевролиты, сланцы, 2 – кристаллический фундамент (поздний докембрий – ранний палеозой), 3 – юрские кварцевые диабазы (по: [Hamilton et al., 1965], с упрощением)

Fig. 5. Subhorizontal sheetlike mafic intrusions in the contact zone of the basement and cover of Victoria Land (Antarctica):

1 – Permian sandstones, siltstones, shales, 2 – crystalline basement (Late Precambrian – Early Paleozoic), 3 – Jurassic quartz diorites (after: [Hamilton et al., 1965], with simplification)

ми метаморфитами (гнейсами и кристалло-сланцами), а также среднепротерозойскими (1,4 млрд лет) гранитами. Низы чехольного комплекса платформы представлены кластическими и карбонатными породами (и кое-где мафическими лавами) группы Арасче среднего протерозоя мощностью (в Аризоне) 850 м. Более молодые, от кембрийских и вплоть до третичных, отложения чехла перекрывают супракрустальные породы среднего протерозоя или залегают непосредственно на породах фундамента.

Зона контакта ранне-среднепротерозойского гранитогнейсового фундамента с породами чехла (группы Арасче или более молодыми) насыщена огромным количеством изначально субгоризонтальных пластовых интрузий диабазов (оливиновых и кварцевых толеитов) среднего протерозоя (интрузии в породах чехла, а также по поверхности контакта фундамент-чехол обычно именуют силлами, а интрузии в фундаменте – горизонтальными дайками или пластовыми интрузиями). Возраст интрузий, определенный различными методами, варьирует от 1,07 до 1,2 млрд лет.

Данный регион уникален тем, что диабазовые «горизонтальные дайки» в породах фундамента являются преобладающими среди интрузивных тел, причем тяготеют они (как и в Земле Виктории) к массивным гранитам и в гораздо меньшем количестве встречаются в метаморфитах, где секут крутопадающую

расслоенность последних, равно как и контакт метаморфитов и гранитов (рис. 6).

Палеоглубины внедрения пластовых интрузий данного региона оцениваются [Howard, 1991] от нуля (предположительно в чехольном комплексе присутствуют и экструзивные комагматы диабазов) до как минимум 13 километров. Однако максимальная концентрация интрузий, равно как и максимальная мощность индивидуальных пластин (до 350 м при протяженности до 30 км) отмечается на глубине первых трех километров от подошвы чехла; глубже мощность горизонтальных даек в фундаменте обычно колеблется от первых метров до нескольких десятков метров. Интервалы между пластинами непостоянные по мощности, но обычно около 100 м. Нередко в пластинах диабазов отмечается гравитационная дифференциация (концентрация оливиновых кристаллов в низах) как свидетельство исходно горизонтального положения пластин.

Оценка деформационной обстановки формирования пластовых интрузий на юго-западе США довольно неопределенна. Предполагается [Howard, 1991], что пластины распространялись перпендикулярно оси растяжения («наподобие процесса гидроразрыва») и что такая ориентировка подразумевает или обстановку горизонтального сжатия («как при надвигах»), или изотропное (литостатическое) поле напряжений. Отмечается, что в региональном масштабе такая деформационная обстанов-

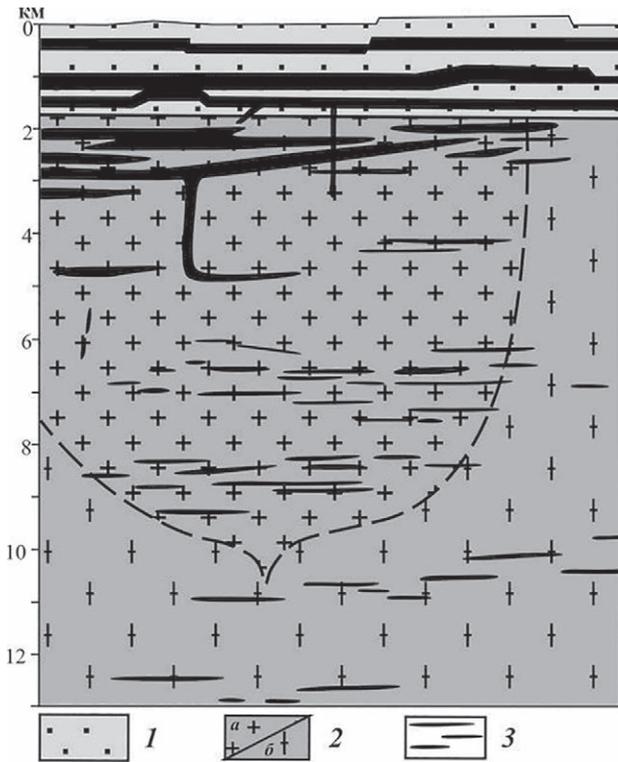


Рис. 6. Субгоризонтальные пластовые интрузии диабазов в зоне контакта фундамент-чехол на юго-западе США:

1 – осадочные породы среднего протерозоя, 2 – фундамент (а – граниты, б – гнейсы), 3 – диабазы (по: [Howard, 1991], с упрощением)

Fig. 6. Subhorizontal diabase sheets in the contact zone of the basement and cover in the southwestern United States:

1 – sedimentary rocks of the Middle Proterozoic, 2 – basement (a – granites, b – gneisses), 3 – diabases (after: [Howard, 1991], with simplification)

ка нехарактерна для базальтоидного магматизма с возрастом 1,0–1,3 млрд в Северной Америке, который здесь повсеместно связан с тектоническим растяжением. Альтернативная трактовка – внедрение пластовых интрузий по ранее возникшим трещинам в породах фундамента – отрицается.

Здесь, на юго-западе США, достаточно подробно изучена и убедительно доказана возможность идентификации пластовых интрузий (как в чехле, так и в фундаменте) на сейсмограммах. Ключевым районом в этих исследованиях явилась центральная и западная часть штата Аризона благодаря хорошей обнаженности и наличию многочисленных буровых скважин. Здесь было установлено, что совокупность сильных сейсмических отражений (BRS – Bagdad Reflection Sequence) на глубине 3–15 км в гнейсах фундамента по Аризонскому трансекту обусловлена наличием субгоризонтальных пла-

стин мафических интрузий [Litak, Hauser, 1992], которые сгруппированы в несколько полос или ярусов (эшелонов), разделенных по вертикали неотражающими зонами мощностью 1–3 км, прослеженных по простиранию на десятки километров, суммарной мощностью примерно 10 км (рис. 7).

Данные сейсмопрофилирования и бурения во многих районах Северо-Американской платформы позволяют предполагать исключительно широкое распространение субгоризонтальных пластовых интрузий основного состава в породах как чехла, так и кристаллического основания платформы. Особенно детально изучена проблема интерпретации природы сейсмических отражений в Западно-Канадском осадочном (нефтегазоносном) бассейне – провинциях Альберта и Саскачеван. В Северной Альберте на сейсмическом 3D-профиле отраженных волн ярко выражены протяженные отражения в средней коре, соответствующие пластинам («силлам») протерозойских долеритов в кристаллическом основании (рис. 8).

В Центральной Альберте серия отражений «Winagami» на глубинах 3,5–18,5 км обусловлена пластовыми интрузиями, секущими петроструктуру кристаллических пород фундамента [Ross et al., 1997; Welford, Clowes, 2004; Welford et al., 2007]. В Южной Альберте серия отражений «Head-Smashed-In» соответствует субгоризонтальным пластинам диабазов мощностью от 10 до 150 м [Mandler, Clowes, 1997]. В Северном Саскачеване серия отражений «Wollaston Lake reflector» на глубинах 6–13,5 км связана с пластинами среднепротерозойских диабазов мощностью 50–150 м [Mandler, Clowes, 1998].

Шотландия, Внутренние Гебриды (остров Малл). Кристаллический фундамент на острове сложен метаморфитами неопротерозойской супергруппы Мойн: метаосадочными кварцитами, слюдяными псаммитами, пелитами и пелитовыми гнейсами. Расслоенность метаморфитов залегает субвертикально, в них зафиксированы трещины трех систем: субвертикальной, наклонной и субгоризонтальной. Чехольный комплекс включает залегающие горизонтально мезозойские сланцы и песчаники мощностью примерно 200 м и вышележащие лавы и вулканокластические породы палеогена мощностью 1,8 км [Stephens et al., 2017].

К магматитам толеитового состава палеогенового комплекса Loch Scridain Sill относятся силлы в породах как фундамента, так и чехла, дайки, а также «Центральный комплекс» из трех слившихся вулканических центров. В породах фундамента силлы секут и расслоенность ме-

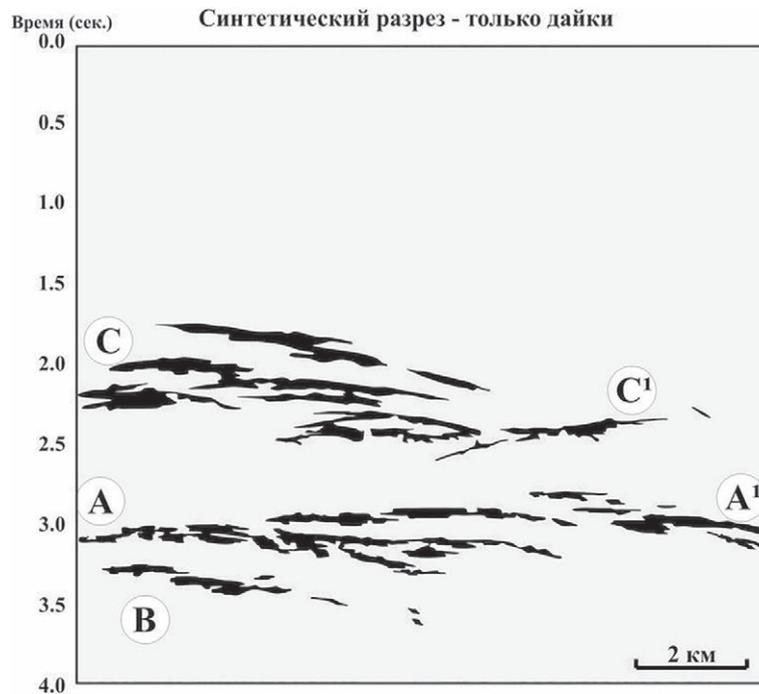


Рис. 7. Синтетический сейсмический разрез района Buck Mountains (Аризона) по отражениям от горизонтальных даек диабазов (черные), сгруппированных в «полосы» С–С', А–А' и В. Вертикальная шкала – двойное время пробега в секундах (по: [Litak, Hauser, 1992], с изменениями и упрощениями)

Fig. 7. Synthetic seismic section of the Buck Mountains (Arizona) by reflections from horizontal diabase dikes (black), grouped into “bands” С–С', А–А' and В. Vertical scale – double travel time in seconds (after: [Litak, Hauser, 1992], with changes and simplifications)

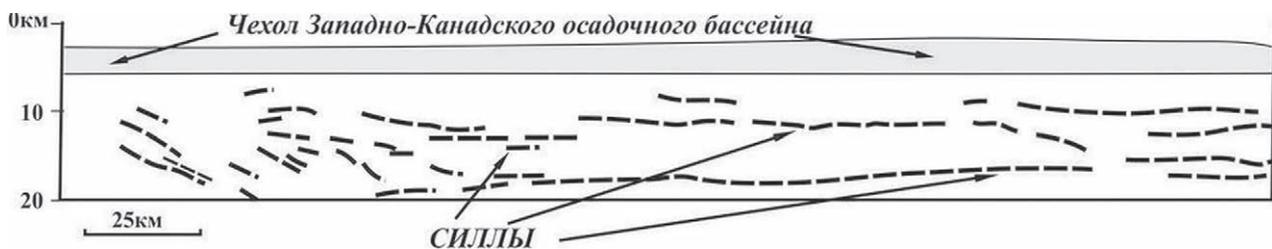


Рис. 8. Силлы (горизонтальные дайки) протерозойских долеритов (пунктир) в кристаллическом основании на сейсмическом профиле в Северной Альберте, Канада (по: [Welford, Clowes, 2006], с упрощениями и дополнениями)

Fig. 8. Sills (horizontal dikes) of Proterozoic dolerites (dotted lines) in a crystalline basement on a seismic profile in Northern Alberta, Canada (after: [Welford, Clowes, 2006], with simplifications and additions)

таморфитов (почти под прямым углом (рис. 9)) и дайки. При этом для силлов в фундаменте отмечаются небольшие ступени, осложняющие их морфологию – по ранее возникшим трещинам различной ориентировки, а также по плоскостям субвертикальной расслоенности метаморфитов. Отсюда авторы работы [Stephens et al., 2017] делают вывод, что в локальном масштабе разрывы и литология играют важную роль в контроле механизма внедрения и морфологии исходных сегментов силла, однако в целом геометрия, вероятно, контролируется «дальним полем напряжения».

Во всех случаях маркеры смещения по контактам силлов с вмещающими метаморфитами указывают на почти вертикальное направление раскрытия. Модель становления силлов в фундаменте, предложенная в [Stephens et al., 2017], включает последовательно: а) почти радиальное горизонтальное укорочение, вызывающее зарождение горизонтальных трещин растяжения и субгоризонтальных трещин растяжения-сдвига, б) внедрение в эти горизонтальные и субгоризонтальные трещины толеитовой магмы и в) увеличение объема («разбухание») сегментов силла, приводящее к разрастанию



Рис. 9. Силл (горизонтальная дайка) палеогеновых толеитов в докембрийских метаморфитах о. Малл, Шотландия (по: [Stephens et al., 2017], с упрощениями и дополнениями)

Fig. 9. Sill (horizontal dike) of Paleogene tholeiites in the Precambrian metamorphic rocks of Mull Island, Scotland (after: [Stephens et al., 2017], with simplifications and additions)

и разветвлению трещин, облегчающих поток магмы и определяющих усложненную геометрию силлов. В региональном масштабе формирование в обстановке горизонтального сжатия интрузий комплекса Loch Scridain Sill связано, как предполагают авторы работы [Stephens et al., 2017], с тектоническими движениями фазы рифтинга и спрединга (~ 55 млн лет) при формировании Северной Атлантики.

Центральная Швеция, Сильян (Siljan Ring area). Девонская астроблема Сильян в Центральной Швеции детально изучалась в 1980-х годах в ходе поисковых работ на abiогенный газ. Поиски оказались безуспешными, но были получены уникальные результаты по интерпретации и корреляции данных сейсморазведки с глубинной геологией – ниже поверхности раздела фундамент-чехол.

Кристаллический фундамент здесь сложен [Juhlin, 1990, 2016; Papasikas, Juhlin, 1997] свекофенскими (древнее 1,75 млрд лет) метаморфитами и гранитоидами более молодого (1,68–1,74 млрд лет) Трансскандинавского гранит-порфиорового пояса. Отложения чехла, имеющие в районе астроблемы крайне ограниченное распространение и малую, не более 350 м, мощность, представлены палеозойскими (силур и ордовик) известняками и кластическими осадками. Но в том же округе Даларна, где расположена структура Сильян, известны и более древние чехольные отложения субиотния и иотния – базальные конгломераты, порфиры и песчаники Дала (последние – с пластовыми телами диабазов); возраст субиотнийских порфиров Дала, определенный Rb-Sr-методом, – 1669 млн лет [Welin, Lundqvist, 1970].

В районе Сильян были пройдены две сверхглубокие скважины: Grayberg-1 (6957 м) и Stenberg-1 (6900 м). Сопоставление данных бурения и геофизических работ на поверхности и в скважинах показало четкое соответствие высокоамплитудных отражений с глубин более 1,5 км на сейсмопрофилях многочисленным пластовым субгоризонтальным интрузиям долеритов в гранитоидах фундамента [Juhlin, 1990; Papasikas, Juhlin, 1997].

В скважине Grayberg-1 такие отражения отвечают либо отдельным долеритовым пластинам (мощностью 20 и 60 м), либо пакетам сближенных менее мощных (3–9 м) пластин (рис. 10). В скважине Stenberg-1 на глубинах около 6 км вскрыты четыре долеритовые пластины мощностью 25–90 м и несколько маломощных пластин на глубинах менее 5,7 км. Площадь распространения отдельных пластовых интрузий долеритов, по геофизическим данным, составляет по крайней мере 800 км². Возраст долеритов пластин оценивается, по аналогии с возрастом близких по составу даек на поверхности, в 0,9–0,97 млрд лет (поздний рифей).

Обсуждение результатов

Формирование субгоризонтальных пластовых интрузий в кристаллическом фундаменте, как можно видеть из вышеприведенных данных, представляет собой процесс, достаточно широко проявленный и в пространстве и во времени. Объем горизонтальных даек основного или щелочного состава достигает очень больших значений – при мощности единичных

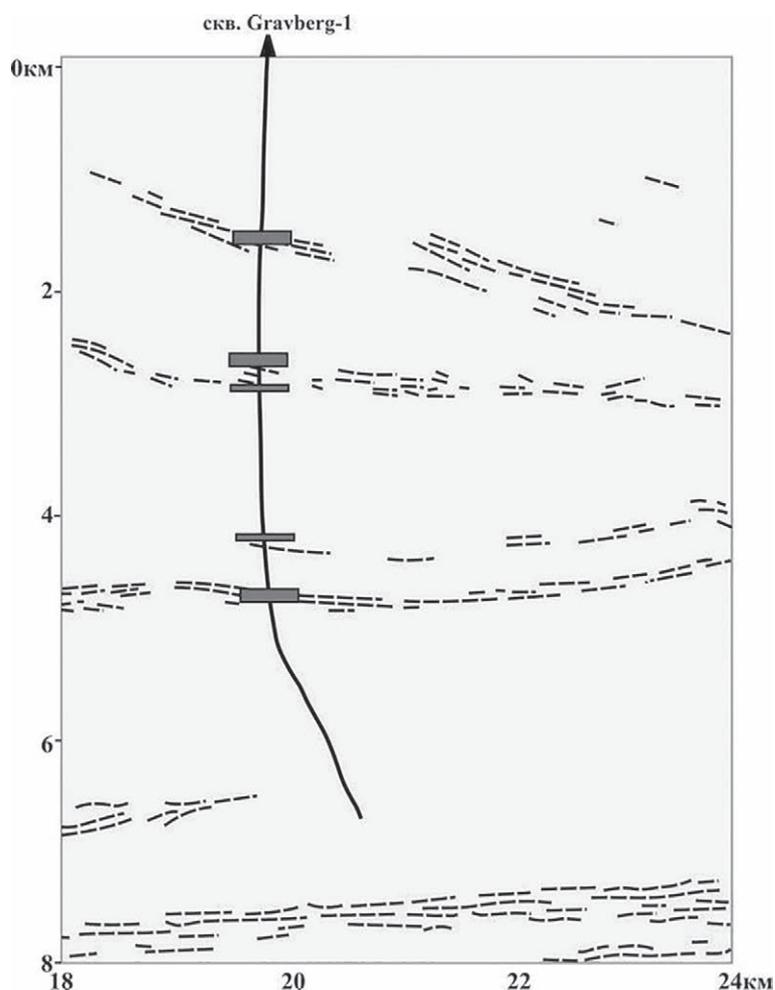


Рис. 10. Сейсмические отражения (пунктир) от пластовых интрузий долеритов (черные интервалы по керну скважины) в гранитоидах фундамента в скважине Gravberg-1, Центральная Швеция (по: [Juhlin, 2016], с упрощениями и дополнениями)

Fig. 10. Seismic reflections (dashed lines) from dolerite sheets (black intervals along the core of the well) in the granitoids of the basement in the well Gravberg-1, Central Sweden (after: [Juhlin, 2016], with simplifications and additions)

интрузий в сотни метров площадь их распространения может исчисляться тысячами и многими десятками тысяч квадратных километров. Возраст их варьирует от палеопротерозоя до палеогена.

Достаточно очевидно, что необходимым условием становления этих интрузий является наличие границы контрастных по физико-механическим свойствам сред – массивных (квазиизотропных) гранитоидов или метаморфитов с субвертикально ориентированной расчлененностью кристаллического фундамента с одной стороны и субгоризонтально залегающих слоистых осадочных пород чехла с другой. При этом интервал времени от момента возникновения этой поверхности раздела (т. е. от нача-

ла накопления осадков чехольного комплекса) до эпизода «силлогенеза» может быть самым различным. Нередко возникновение комплекса горизонтальных даек в фундаменте относится еще ко времени формирования отложений нижних или средних горизонтов разреза чехла, но иногда, как на Алданском щите, отстоит от начала формирования чехольного комплекса на сотни миллионов лет.

Глубина распространения горизонтальных даек (или «пакетов» этих пластовых интрузий) вниз от подошвы чехольных отложений обычно варьирует от 0 («межформационные силлы», локализованные примерно по контакту фундамент-чехол) до первых километров; реже достигает 6–7 км, а может даже превышать

10 км. Там, где кристаллический фундамент изучен (геофизическими методами, буровыми скважинами) на большую глубину (юго-запад США, Западно-Канадский нефтегазоносный бассейн, астроблема Сильян в Центральной Швеции), твердо установлено, что горизонтальные дайки в гранитоидах и метаморфитах организованы в многоярусные системы, в которых эти дайки сгруппированы в полосы (эшелоны), разделенные по вертикали интервалами с небольшим числом даек или вообще без таковых.

Как установлено в провинции Альберта (Канада), залегание силлов мощностью в десятки и сотни метров (определяющих серию сейсмических площадок «Head-Smashed-In») в фундаменте точно соответствует конфигурации поверхности контакта фундамент-чехол: на участках его максимального прогибания и, соответственно, возрастания мощности и угла падения отложений чехла, точно так же меняется залегание (с флексурным изгибом) и горизонтальных даек диабазов в кристаллическом фундаменте [Mandler, Clowes, 1997]. То есть эти дайки в фундаменте изначально были ориентированы строго параллельно (неровной) поверхности контакта фундамент-чехол.

Горизонтальные дайки в кристаллическом фундаменте практически всегда являются одним из элементов крупных магматических комплексов, включающих, помимо горизонтальных даек, и питающие дайки, и силлы в отложениях чехла, а также иногда и мелкие интрузивные и субвулканические тела и лавовые покровы: комплекс Ferrar Dolerite в Антарктиде, Loch Scridain Sill Complex острова Малл в Шотландии, GWA (габбро-верлитовая ассоциация) в Финляндии, Алданский щелочной интрузивно-вулканогенный комплекс и др. И, как отмечено при описании интрузий Земли Виктории в Антарктиде, такие комплексы вместе с эффузивными комагматами могут составлять огромные по масштабу объединенные магматические системы.

Как правило, в горизонтальных дайках фиксируется четкая гравитационная дифференциация по составу, например (снизу вверх): диабазы – габбро – гранофиры и диабазы (Антарктида), верлиты – клинопироксениты и габбро – гранофиры (Коли, Финляндия), пикриты и коматииты – оливинсодержащие долериты (Кольский п-ов) и т. п. И подобная дифференциация однозначно указывает на исходно горизонтальное размещение этих пластовых интрузий.

Обращаясь к региональной геодинамической ситуации во время формирования маг-

матических комплексов, включавших горизонтальные дайки, в различных регионах, обнаружить какую-то специфику, существование общих, «сквозных» особенностей геодинамической обстановки «эпох силлогенеза» трудно.

На обширной территории Восточной и Северной Финляндии, а также в Карелии становление в палеопротерозое комплекса мафит-ультрамафитовых интрузий карьялитов (габбро-верлитовой ассоциации Финляндии), включающего горизонтальные дайки района Коли и долерит-габбродиоритового комплекса Онежской структуры с пластинчатой Пудожгорской интрузией, относится ко времени существования длительного, достаточно тектонически спокойного режима континентального осадконакопления ятулийских терригенных пород. И примечательно, что продолжительность этого эпизода «силлогенеза» и финские и российские исследователи оценивают как относительно небольшую: около 40 млн лет в Карелии [Онежская..., 2011] и менее чем «разрешающая способность методов датирования» в Финляндии [Hanski et al., 2010]. Так что силлогенез здесь носит характер кратковременной «вспышки» на фоне продолжительного стабильного прогибания поверхности кристаллического фундамента и накопления ятулийских осадков чехла.

Формирование мезопротерозойских (1,1–1,265 млрд лет) горизонтальных даек диабазов юго-запада США и Западной Канады предполагает [Howard, 1991] региональную обстановку горизонтального сжатия («как при надвигах») или изотропного (литостатического) поля напряжений. Но такая деформационная обстановка в Северной Америке, как замечено выше, нехарактерна для базальтоидного магматизма с возрастом 1,0–1,3 млрд лет, который здесь связан с тектоническим растяжением. Так что, по мнению автора работы [Howard, 1991], возможно, диабазовый магматизм (силлогенез) является магматизмом горячей внутриплитной точки.

Становление неопротерозойских (возраст 900–970 млн лет) долеритовых горизонтальных даек Сильяна (Центральная Швеция) можно, по аналогии с, видимо, синхронными (975–1000 млн лет) горизонтальными долеритовыми пластовыми интрузиями побережья Баренцева моря, залегающими как в терригенных породах рифейского чехла, так и в архейских метаморфитах фундамента [Пржиялковский и др., 2008], связать с процессами рифейского континентального рифтинга.

Внедрение среднеюрских горизонтальных даек кварцевых диабазов, долеритов и габ-

броидов Земли Виктории в Антарктиде, так же как и подобных пластовых интрузий Юго-Восточной Австралии и Южной Африки, относится к эпохе распада Гондваны. Щелочной магматизм юры-мела, включающий формирование горизонтальных даек сиенитов в фундаменте Алданского щита, представляет собой одно из событий мезозойской эпохи грандиозной тектоно-магматической активизации. А становление в палеогене магматического Loch Scridain Sill Complex Шотландии (включающего горизонтальные дайки толеитов в докембрийских метаморфитах острова Малл) относят [Stephens et al., 2017] к фазе рифтинга и спрединга при формировании Северной Атлантики.

Переходя к обсуждению деформационной обстановки формирования горизонтальных даек, подчеркнем уже упомянутый выше принципиальный момент: рассмотрению подлежат два в общем случае независимых механизма: а) возникновения в породах фундамента субгоризонтальных плоскостных структур, которые сделали возможным проникновение магмы в массивные квазиизотропные гранитоиды (или субвертикально расслоенные метаморфиты) и б) последующего внедрения (становления) самих субгоризонтальных пластовых интрузий.

В большинстве работ, так или иначе затрагивающих проблему становления горизонтальных даек в фундаменте, внимание исследователей ограничено механизмами внедрения этих интрузий и практически не рассматривается вопрос о механизмах возникновения «предваряющей» внедрение интрузий плоскостной анизотропии в породах фундамента, т. е. системы субгоризонтальных ослабленных плоскостей, игравших роль проводников магмы. По-видимому, единственная попытка рассмотрения возможного механизма возникновения такой «предсилловой» субгоризонтальной плоскостной анизотропии в породах фундамента содержится в работе, посвященной горизонтальным дайкам Земли Виктории в Антарктиде. Здесь предполагается [Hamilton et al., 1965], что локализация пластовой интрузии диабазов (Basement sill) мощностью 200–450 м в гранитоидах фундамента контролируется субгоризонтальными трещинами «отслоения», возникшими, возможно, в эпоху эрозии фундамента, т. е. до накопления кластических осадков чехла. Такие трещины «густеют» вверх от кровли Basement sill и «редеют» вниз от его подошвы, а на глубинах более 1 км от контакта фундамент-чехол практически исчезают. Подобные системы субгоризонтальных трещин описаны и в гранитоидах фундамента, вмещающих горизонтальные

дайки на юго-западе США, но здесь их рассматривают как возникающие одновременно с внедрением этих даек [Howard, 1991].

На Алданском щите, как отмечено выше, очевидна приуроченность горизонтальных даек сиенитов к зонам брекчирования *in situ* в гранитоидах и метаморфитах фундамента – зонам того же типа, по-видимому, что и субгоризонтальные зоны брекчированных гранитов рапакиви («того»), описанные П. Эскола в Финляндии (см. рис. 4, Б). В Ималыкском железорудном районе Алданского щита буровые скважины в кристаллическом фундаменте пересекают и горизонтальные дайки сиенитов, и зоны брекчирования, «залеченные» сиенитами только на часть своей мощности, и зоны брекчирования *in situ* вообще без сиенитов (см. рис. 4, А).

Связь горизонтальных даек с зонами брекчирования в породах кристаллического фундамента можно обнаружить и в других районах. Так, на юго-западе США, в Аризоне, установлено, что пластовые диабазовые интрузии ассоциируют с зонами брекчирования, так что иногда скважины, пересекающие сейсмические отражения, обусловленные этими интрузиями, вскрывают не диабазы, но зону хлоритизированных брекчий по гранитам. То есть, по мнению исследователей [Litak, Hauser, 1992], скважины проходят в промежутке между сегментами одной, но прерывистой по простиранию мафической пластины, внедрившейся в зону брекчирования в породах фундамента. Аналогичная картина «прерывистого» распространения, с многочисленными «лакунами» по простиранию, мафических пластин наблюдается и в коренных обнажениях в горах Buck Mountains (см. рис. 7) и в других районах [Mandler, Clowes, 1997].

В районе Сильян в Швеции, где на небольшом расстоянии друг от друга были пройдены две семикилометровые скважины, зафиксировано соответствие вскрытых скважинами пластин долеритов субгоризонтальным отражающим сейсмическим площадкам. При этом по данным бурения установлено, что некоторые из долеритовых пластовых интрузий отчетливо связаны с тектоническими зонами сильно трещиноватых (передробленных) гранитоидов. И, сравнивая данные по двум этим глубоким скважинам, можно заметить известную «взаимозаменяемость» в разрезе силлов долеритов и зон дробления в гранитах. Если в разрезе скважины Grayberg-1 на глубинах менее 5,7 км вскрыто несколько мощных и несколько менее мощных пластин долеритов (из которых три в интервале 4,6–4,8 км ассоциируют с зонами

дробления), то в скважине Stenberg-1 в этом же интервале глубин отмечено лишь несколько маломощных тел долеритов (некоторые – тоже в ассоциации с зонами брекчий), а также подобные зоны дробления, но без долеритов (наиболее четко проявленная из них – у отметки в 3 км) [Juhlin, 1990, 2016]. Таким образом, можно предположить, что здесь, как и в Аризоне, «прерывистые» пластины долеритов внедряются в граниты фундамента по субгоризонтальным зонам дробления.

Ассоциация мафитовых пластовых интрузий с зонами (участками) дробления гранитоидов и метаморфитов фундамента отмечается и в других районах распространения горизонтальных даек. Так, связь с хрупкими разрывными нарушениями вмещающих пород зафиксирована для Пудожгорской интрузии [Онежская..., 2011]. Горизонтальная дайка пикритов в зоне катаклаза гранито-гнейсов отмечена и в докембрийских породах к северу от Печенгской рифтогенной впадины [Морозов и др., 2017].

В целом, по всей видимости, именно системы многоярусных (эшелонированных по вертикали) субгоризонтальных зон дробления и/или брекчирования создают ту «исходную» плоскостную анизотропию пород фундамента, с возникновением которой стало возможным проникновение по этим зонам магмы, т. е. становление горизонтальных даек (см. рис. 7 и 8). По аналогии с ситуацией на Алданском щите можно предположить, что такие зоны представляют собой, по-видимому, зоны дробления *in situ* – без каких-либо смещений и признаков сколовой деформации.

Эти «исходные» зоны дробления и/или брекчирования *in situ* в дальнейшем, уже на стадии внедрения пластовых интрузий (или шире – формирования магматических комплексов, элементом которых являются горизонтальные дайки) могут трансформироваться в зоны сколовой деформации с различной кинематикой: надвиговой со сдвиговой компонентой [Морозов и др., 2017], трещин растяжения и растяжения-сдвига [Stephens et al., 2017], трещин отрыва [Трофимов и др., 2006; Трофимов, Голубев, 2008]. Становление синдеформационных горизонтальных даек в некоторых случаях может также включать механизмы магмо/гидро-разрыва [Howard, 1991; Морозов и др., 2017].

Условия возникновения «исходных» зон дробления и/или брекчирования *in situ* можно оценить, исходя из характерных особенностей этих зон, а также приуроченных к ним горизонтальных даек:

– Эти зоны (и приуроченные к ним горизонтальные дайки) зафиксированы только в ре-

гионах, где по субгоризонтальной поверхности граничат два комплекса пород, резко отличающихся по физико-механическим свойствам и структурно-текстурным характеристикам: гранитоидов и метаморфитов кристаллического фундамента с одной стороны и осадочных (вулканогенно-осадочных) отложений платформенного или субплатформенного чехла с другой.

- Зоны дробления и/или брекчирования (и дайки) распределены в интервале глубин от 0 до 18 км (возможно, и более) от подошвы чехла, но обычно максимальное их число приурочено к глубинам в первые километры.
- Эти зоны (и дайки) сгруппированы в «эшелонированные» по вертикали (многоярусные) полосы протяженностью в десятки и первые сотни километров при мощности единичных зон от первых метров до первых сотен метров.
- Установлено, что на участках, где к моменту формирования зон дробления и становления приуроченных к ним пластовых интрузий поверхность контакта фундамент-чехол была деформирована (конседиментационным прогибанием), зоны дробления и интрузии в фундаменте ориентированы параллельно этой неровной подошве чехольных отложений.
- Отсутствие в «сухих» зонах дробления и/или брекчирования каких-либо признаков смещения (и по контактам зон, и между обломками) и каких-либо деформационных плоскостных структур не позволяет связывать возникновение этих зон со сколовой деформацией и свидетельствует об «объемном» дроблении/брекчировании *in situ* пород в таких зонах.
- В геологической истории возникновение зон дробления, вмещающих горизонтальные дайки, прослеживается от палеопротерозоя до палеогена. При этом интервал времени от начала накопления отложений чехла (т. е. от «момента» появления поверхности раздела резко различных по свойствам комплексов пород) до этапа образования зон дробления и становления горизонтальных даек может быть различным: где-то они возникают еще во время накопления отложений низов разреза чехла, а где-то отстоят от начала формирования чехольного комплекса на сотни миллионов лет.
- Оценить длительность самого этапа образования зон дробления и последующего становления горизонтальных даек («этапа силлогенеза») практически невозможно.

Можно только предположить, что этот этап, по крайней мере в некоторых регионах, был весьма непродолжительным – если, как в Финляндии, длительность эпизода GWA-магматизма, к которому относится формирование горизонтальных даек района Коли, меньше, чем «разрешающая способность» методов датирования.

- «Силлогенез», включая предварительное формирование зон дробления и/или брекчирования, нельзя соотнести с какой-либо определенной (специфической) региональной геодинамической обстановкой – он производит впечатление «космополитичного» процесса и может быть проявлен и на фоне длительного тектонически спокойного прогибания с накоплением отложений платформенного (протоплатформенного) чехла, и в обстановке регионального рифтинга и спрединга, и в эпоху мощной тектоно-магматической активизации платформы.

Механизм возникновения в массивных (не обладающих субгоризонтальной расслоенностью) породах фундамента зон дробления и/или брекчирования *in situ* параллельно контакту фундамент-чехол неясен. По мнению автора, совокупность характеристик зон дробления *in situ* и локализованных в них горизонтальных даек, по всей видимости, указывает на волновой контроль их формирования – как следствие отражения от поверхности раздела двух контрастных по физико-механическим свойствам сред волн упругой деформации. Можно предположить, что при этом в фундаменте возникает поле стоячих волн, динамические характеристики которого (узлы, пучности) определяют локализацию зон дробления *in situ*. В экспериментах [Ильченко, 2012] динамическое воздействие на горную породу в поле стоячих волн приводило к возникновению в узлах стоячих волн (на участках концентрации напряжений) трещин, которые далее растут и сливаются уже в зоны трещиноватости. Моделирование для разреза сверхглубокой Кольской скважины подтвердило волновой контроль геодинамических процессов, с трансформацией упругих колебаний в систему стоячих волн, определяющих тектоническую расслоенность Печенгского блока [Ильченко, 2012]. Суть «объемного» брекчирования/дробления заключается, очевидно, в достаточно резком сбросе напряжений – вариант известного [Горяинов, Давиденко, 1979; Горяинов, 2018] тектоно-кессонного эффекта.

Возникающие подобным образом зоны «дробления *in situ*» оказываются, в ходе дальнейшей геодинамической эволюции, структур-

ными концентраторами напряжений, с одной стороны, и зонами магмо/флюидно/гидротермальной проницаемости, с другой, и могут трансформироваться как в зоны сколовой деформации, так и в проводники магматического материала (с возникновением, в частности, комплекса пластовых интрузий).

С высокой проницаемостью возникающих зон дробления и/или брекчирования *in situ* в фундаменте и гомологичных им послойных тектонических зон в стратифицированных породах чехла связан еще один, не рассматриваемый здесь, аспект проблемы геологического значения границы фундамент-чехол – металлогенический. С пластовыми интрузиями диабазов на юго-западе США [Howard, 1991] связаны месторождения урана, асбеста, магнетита, с Пудожгорской интрузией в Прионежье – титаномагнетитовое и благороднометалльное оруденение [Трофимов и др., 2006; Трофимов, Голубев, 2008], а с пластовыми щелочными интрузиями Алданского щита ассоциируют в породах как фундамента, так и чехла многочисленные крупные флюидно-гидротермальные месторождения золота и урана [Леонтьев, 2016]. Не исключено, что в сходной геодинамической обстановке, в зоне контакта фундамент-чехол, возникла и часть интрузивных тел (силлы, дайки, жилы) кимберлитов и лампроитов, в т. ч. алмазонасных, Зимнего Берега Белого моря и Западной Австралии [Mitchell et al., 1991].

Заключение

Анализ геолого-структурной позиции, геодинамической и деформационной обстановки возникновения горизонтальных даек (пластовых интрузий) в различных регионах мира позволил выявить такие их общие особенности, как: неизменную приуроченность к областям с двухъярусным строением (кристаллический фундамент – чехол); распространение их в фундаменте в диапазоне нескольких километров от подошвы чехла; изначально субгоризонтальное залегание – параллельно поверхности контакта фундамент-чехол; группировка в многоярусную систему эшелонированных по вертикали пластин; обычно, видимо, «прерывистое» (четковидное) строение по простиранию; отсутствие четкой связи с каким-либо конкретным типом региональной геодинамической обстановки (своего рода «космополитизм»).

Обязательным условием внедрения горизонтальных даек предлагается считать предварительное возникновение в породах фундамента субгоризонтальной плоскостной анизо-

тропии, наиболее обычной формой которой, по-видимому, являются зоны «объемного» дробления и/или брекчирования *in situ*. Сделано предположение, что формирование подобных зон дробления может контролироваться стоячими волнами, возникающими в фундаменте при отражении волн упругой деформации от поверхности раздела двух контрастных по физико-механическим свойствам сред – кристаллического фундамента и чехла. Механизм «объемного» брекчирования, видимо, заключается в достаточно резком сбросе напряжений (тектоно-кессонный эффект) в таких зонах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-05-00256 А).

Литература

- Ветрин В. Р.* Протерозойские процессы магматизма и метасоматоза в архейских породах фундамента Печенгского палеорифта // Вестник МГТУ. 2007. Т. 10, № 1. С. 116–129.
- Горяинов П. М., Давиденко И. В.* Тектоно-кессонный эффект в массивах горных пород и рудных месторождений – важное явление геодинамики // ДАН СССР. 1979. Т. 247, № 5. С. 1212–1215.
- Горяинов П. М.* Бескорневые энергогенерирующие очаги нерадиоактивной природы в литосфере (тектоно-кессонный эффект и его возможная роль в синтезе углеводородов) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. Т. 15. С. 120–123.
- Ильченко В. Л.* Тектоностратиграфическая модель блока земной коры как колебательной системы (на примере Печенгского блока, Кольский полуостров) // Вестник КНЦ РАН. 2012. № 1. С. 172–177.
- Кулаковский А. Л.* Катаклиз, бластез и неоминерализация в породах Тарыннахского месторождения // Железисто-кремнистые формации докембрия / Ред. Г. Г. Кравченко. М.: Наука, 1979. С. 55–105.
- Леонтьев В. И.* Геолого-генетические закономерности локализации золотого оруденения на месторождении Подголецное (Алданский щит): Дис. ... канд. геол.-минер. наук. СПб.: ВСЕГЕИ, 2016. 128 с.
- Морозов Ю. А., Галыбин А. Н., Мухамедиев Ш. А., Смутьская А. И.* Тектонический и геомеханический контроль размещения даек и силлоподобных тел в северо-западной части Кольского полуострова // Геотектоника. 2017. № 3. С. 28–60. doi: 10.7868/S0016853X17030079
- Онежская* палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минералогия) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 432 с.
- Петров А. Ф.* Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000, серия Бодайбинская. Лист О-50-XVIII и объяснительная записка. М.: Госгеолтехиздат, 1976. 92 с.
- Петров А. Ф.* Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000, серия Бодайбинская. Лист О-50-XVIII и объяснительная записка. М.: Госгеолтехиздат, 1978. 116 с.
- Пржиялковский Е. С., Балуев А. С., Терехов К. Н.* Структурная позиция силлов и даек долеритов в южном борту Баренцевоморского рифта рифейского возраста // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными: Матер. XIV междунар. конф. Петрозаводск, 2008. Ч. 2. С. 124–127.
- Терехов Е. Н., Морозов Ю. А., Смолькин В. Ф., Баянова Т. Б., Серов П. А., Щербакова Т. Ф., Смутьская А. И.* Особенности дайкового магматизма в северном обрамлении Печенгской структуры // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 1. С. 48–63.
- Трофимов Н. Н., Голубев А. И., Смирнова Н. К.* Особенности морфологии и перспективы рудоносности Пудожгорского интрузива // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 72–80.
- Трофимов Н. Н., Голубев А. И.* Пудожгорское благороднометалльное титаномагнетитовое месторождение. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 123 с.
- Турченко С. И.* Металлогенические особенности Печенгской рифтогенной структуры (Кольский геоблок Балтийского щита) // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 2. С. 40–51. doi: 10.17076/geo296
- Хомич В. Г., Борискина Н. Г.* Природа позднепротерозойских рудномагматических систем Алданского щита // Литосфера. 2016. № 2. С. 70–90.
- Eskola P.* On the disintegration of rapakivi // Extrait des Comptes Rendus de la Societe geologique de Finlande. 1930. No. 3. 10 p.
- Hamilton W., Hayes P. T., Calvert R.* Diabase sheets of the Taylor Glacier region, Victoria Land, Antarctica // U. S. Geol. Surv. Prof. Paper. 1965. 456-B. 71 p.
- Hanski E., Huhma H., Vuollo J.* SIMS zircon ages and Nd isotope systematics of the 2.2 Ga mafic intrusions in northern and eastern Finland // Bull. Geol. Soc. Finland. 2010. Vol. 82. P. 31–62.
- Howard K. A.* Intrusion of horizontal dikes: tectonic significance of Middle Proterozoic diabase sheets widespread in the Upper Crust of the Southwestern United States // J. Geophys. Res. 1991. Vol. 96, iss. B7. P. 12461–12478.
- Jerram D. A., Davis G. R., Mock A., Charrier A., Marsh B. D.* Quantifying 3D crystal populations, packing and layering in shallow intrusions: a case study from the Basement sill, Dry valleys, Antarctica // Geosphere. 2010. Vol. 6. P. 537–548.
- Juhlin C.* Interpretation of the reflections in the Siljan Ring area based on results from the Gravberg-1 borehole // Tectonophysics. 1990. Vol. 173. P. 345–360.
- Juhlin C.* Appraisal of geological barriers in the upper crust based on some crystalline rock drilling projects and geophysical data: Focus on Sweden // Final Disposal in Deep Boreholes Using Multiple Geological Barriers: Digging Deeper for safety: Proceed. of the Workshop, Juni 2015. Berlin: GRS gGmbH, 2016. P. 83–106.
- Laajoki K.* Karelian supracrustal rocks // Lehtinen M., Nurmi P. A., Ramo O. T. (Eds.) Precambrian Geology of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield. Amsterdam: Elsevier B. V., 2005. P. 279–342.

Litak R. K., Hauser E. C. Bagdad Reflection Sequence as tabular mafic intrusions: Evidence from seismic modeling of mapped exposures // GSA Bulletin. 1992. Vol. 104(10). P. 1315–1325.

Mandler H. A. F., Clowes R. M. Evidence for extensive tabular intrusions in the Precambrian shield of western Canada: A 160-km-long sequence of bright reflections // Geol. 1997. Vol. 25(3). P. 271–274.

Mandler H. A., Clowes R. M. The HSI bright reflector: Further evidence for extensive magmatism in the Precambrian of western Canada // Tectonophysics. 1998. Vol. 288(1–4). P. 71–81.

Mitchell R. H., Bergman S. C. Description of lamproite: Occurrences, distribution, age, characteristics, and geological framework // Petrology of Lamproites. Ch. 3. New York: Springer Science+Business Media, 1991. P. 39–102.

Muirhead J. D., Airoldi J., Rowland J. V., White J. D. L. Interconnected sills and inclined sheet intrusions control shallow magma transport in the Ferrar large igneous province, Antarctica // Geol. Soc. Am. Bull. 2012. Vol. 124(1–2). P. 162–180.

Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the eastern and northern Finland / Eds. J. I. Vuollo, Zh. A. Fedotov // Dyke swarms – time markers of crustal evolution: Fifth International Dyke Conference (31 July – 3 August 2005, Rovaniemi, Finland). Post-conference Field Trip. Guidebook: Eastern and Northern Finland – Belomoride Mobile Belt and Kola Peninsula. Part 1. 2005. 84 p.

Papasikas N., Juhlin C. Interpretation of reflections from the central part of the Siljan ring impact structure based on results from the Stenberg-1 borehole // Tectonophysics. 1997. Vol. 269, no. 3–4. P. 237–245.

Pekkarinen L. J., Lukkarinen H. Paleoproterozoic volcanism in the Kiihtelysvaara – Tohmajärvi district, eastern Finland // Geol. Survey of Finland. 1991. Bull. 357. 30 p.

References

Goryainov P. M., Davidenko I. V. Tektono-kessonnyi effekt v massivakh gornyykh porod i rudnykh mestorozhdenii – vazhnoe yavlenie geodinamiki [The tectonic-caisson effect in rock massifs and ore deposits is an important phenomenon of geodynamics]. DAN SSSR [Proceed. Acad. Sci. USSR]. 1979. Vol. 247, no. 5. P. 1212–1215.

Goryainov P. M. Beskornevye energogeneriruyushchie ochagi neradioaktivnoi prirody v litosfere (tektono-kessonnyi effekt i ego vozmozhnaya rol' v sinteze uglevodorodov) [Rootless energy generating foci of non-radioactive substitutions in the lithosphere (tectonic-caisson effect and its possible role in the synthesis of hydrocarbons)]. Trudy Fersmanovskoi nauch. sessii GI KNTs RAN [Proceed. Fersman sci. session GI KSC RAS]. 2018. Vol. 15. P. 120–123.

Il'chenko V. L. Tektonostratigraficheskaya model' bloka zemnoi kory kak kolebatel'noi sistemy (na primere Pechenskogo bloka, Kol'skii poluostrov) [Tectonostratigraphic model of the block of the earth's crust as an oscillation system (on the example of the Pechenga block, Kola Peninsula)]. Vestnik KNTs RAN [Vestnik KolSC RAS]. 2012. No. 1. P. 172–177.

Ross G. M., Eaton D. W. Winagami reflection sequence: Seismic evidence for postcollisional magmatism in the Proterozoic of western Canada // Geology. 1997. Vol. 25. P. 199–202.

Sorjonen-Ward P. Structural and hydrothermal event history of the Koli-Kaltimo-Eno region – a preliminary regional framework // GTK Report CM 60/2006/3. 16 p.

Stephens T. L., Walker R. J., Healy D., Bubeck A., England R. W., McCaffrey K. J. W. Igneous sills record far-field and near-field stress interactions during volcano construction: Isle of Mull, Scotland // Earth and Planetary Science Letters. 2017. Vol. 478. P. 159–174.

Vuollo J., Piirainen T. The 2.2 Ga old Koli layered sill: The low-Al tholeiitic (karjalitic) magma type and its differentiation in northern Karelia, eastern Finland // Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar. 1992. Vol. 114(1). P. 131–142. doi: 10.1080/11035899209453466

Welford J. K., Clowes R. M. Deep 3-D seismic reflection imaging of Precambrian sills in southwestern Alberta, Canada // Tectonophysics. 2004. Vol. 388. P. 161–172.

Welford J. K., Clowes R. M. Three-dimensional seismic reflection investigation of the upper crustal Winagami sill complex of northwestern Alberta, Canada // Geophys. J. Int. 2006. Vol. 166. P. 155–169.

Welford J. K., Hearn E. H., Clowes R. M. Possible role of midcrustal igneous sheet intrusions in cratonic arch formation // Tectonics. 2007. Vol. 26(5). TC 5012. doi: 10.1029/2006TC002023

Welin E., Lundqvist T. New Rb-Sr Age Data for the Sub-Jotnian Volcanics (Dala Porphyries) in the Los-Hamra Region, Central Sweden // Geologiska Foereningen i Stockholm. Foerhandlingar. 1970. Vol. 92(1). P. 35–39.

Поступила в редакцию 26.05.2021

Khomich V. G., Boriskina N. G. Priroda pozdnemezozoiskikh rudnomagmatischenkikh sistem Aldanskogo shchita [The nature of the Late-Mesozoic ore-magmatic systems of the Aldan Shield]. Litosfera [Lithosphere]. 2016. No. 2. P. 70–90.

Kulakovskii A. L. Kataklaz, blastez i neomineralizatsiya v porodakh Tarynnakhskogo mestorozhdeniya [Cataclase, blastez and neomineralization in the rocks of the Tarynnakh deposit]. Zhelezisto-kremnistye formatsii dokembriya [Precambrian BIF]. Ed. G. G. Kravchenko. Moscow: Nauka, 1979. P. 55–105.

Leont'ev V. I. Geologo-geneticheskie zakonomernosti lokalizatsii zolotogo orudneniya na mestorozhdenii Podgolechnoe (Aldanskii shchit) [Geological and genetic patterns of the localization of gold mineralization at the Podgolechnoe deposit (Aldan Shield)]: PhD (Cand. of Geol.-Miner.) thesis. St. Petersburg: VSEGEI, 2016. 128 p.

Morozov Yu. A., Galybin A. N., Mukhamediev Sh. A., Smul'skaya A. I. Tektonicheskii i geomekhanicheskii kontrol' razmeshcheniya daek i sillopodobnykh tel v severo-zapadnoi chasti Kol'skogo poluostrova [Tectonic and geomechanical control of the placement of dykes

and silllike bodies in the northwestern part of the Kola Peninsula]. *Geotektonika* [Geotectonics]. 2017. No. 3. P. 28–60. doi: 10.7868/S0016853X17030079

Oneshskaya paleoproterozoiskaya struktura (geologiya, tektonika, glubinnoe stroenie i minerageniya) [Onega Paleoproterozoic structure (geology, tectonics, deep structure and minerageny)]. Eds. L. V. Glushanin, N. V. Sharov, V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2011. 432 p.

Petrov A. F. Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200 000, seriya Bodaibinskaya. List O-50-XVII i ob'yasnitel'naya zapiska [Geological map of the USSR. Scale 1: 200,000, Bodaibo series, O-50-XVII sheet and an explanatory note]. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1976. 92 p.

Petrov A. F. Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200 000, seriya Bodaibinskaya. List O-50-XVIII i ob'yasnitel'naya zapiska [Geological map of the USSR. Scale 1:200,000, Bodaybo series, O-50-XVIII sheet and an explanatory note]. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 1978. 116 p.

Przhiyalkovskii E. S., Baluev A. S., Terekhov K. N. Strukturnaya pozitsiya sillov i daek doleritov v yuzhnom bortu Barentsevomorskogo rifta rifeiskogo vozrasta [The structural position of dolerite sills and dykes in the southern board of the Riphean Barents Sea rift]. *Svyaz' poverkhnostnykh struktur zemnoi kory s glubinnymi: Mater. XIV mezhdunar. konf.* [The connection of the surface structures of the earth's crust with the deep ones. Proceed. XIV int. conf.]. Petrozavodsk, 2008. Pt. 2. P. 124–127.

Terekhov E. N., Morozov Yu. A., Smol'kin V. F., Bayanova T. B., Serov P. A., Shcherbakova T. F., Smul'skaya A. I. Osobennosti daikovogo magmatizma v severnom obramlenii Pechengskoi struktury [Features of dyke magmatism in the northern framing of the Pechenga structure]. *Vestnik MGTU* [Bull. Murmansk St. Tech. Univ.]. 2019. Vol. 22, no. 1. P. 48–63.

Trofimov N. N., Golubev A. I., Smirnova N. K. Osobennosti morfologii i perspektivy rudnosnosti Pudozhgorskogo intruziva [Features of morphology and perspectives of ore content of the Pudozhgorsk intrusive]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and mineral resources of Karelia]. Iss. 9. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2006. P. 72–80.

Trofimov N. N., Golubev A. I. Pudozhgorskoe blagorodnometall'noe titanomagnetitovoe mestorozhdenie [Pudozhgorsk noble-metal titanium-magnetite deposit]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2008. 123 p.

Turchenko S. I. Metallogenicheskie osobennosti Pechengskoi riftogennoi struktury (Kol'skii geoblok Baltiiskogo shchita) [The metallogenic features of the Pechenga rift structure (Kola geoblock of the Baltic Shield)]. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of KarRC RAS]. 2016. No. 2. P. 40–51. doi: 10.17076/geo296

Vetrin V. R. Proterozoiskie protsessy magmatizma i metasomatoza v arkhaiskikh porodakh fundamenta Pechengskogo paleorifta [Proterozoic processes of magmatism and metasomatism in the Archean rocks of the basement of the Pechenga paleorift]. *Vestnik MGTU* [Bull. MSTU]. 2007. Vol. 10, no. 1. P. 116–129.

Eskola P. On the disintegration of rapakivi. Extrait des Comptes Rendus de la Societe geologique de Finlande. 1930. No. 3. 10 p.

Hamilton W., Hayes P. T., Calvert R. Diabase sheets of the Taylor Glacier region, Victoria Land, Antarctica. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper. 1965. 456-B. 71 p.

Hanski E., Huhma H., Vuollo J. SIMS zircon ages and Nd isotope systematics of the 2.2 Ga mafic intrusions in northern and eastern Finland. Bull. Geol. Soc. Finland. 2010. Vol. 82. P. 31–62.

Howard K. A. Intrusion of horizontal dikes: tectonic significance of Middle Proterozoic diabase sheets widespread in the Upper Crust of the Southwestern United States. J. Geophys. Res. 1991. Vol. 96, iss. B7. P. 12461–12478.

Jerram D. A., Davis G. R., Mock A., Charrier A., Marsh B. D. Quantifying 3D crystal populations, packing and layering in shallow intrusions: a case study from the Basement sill, Dry valleys, Antarctica. Geosphere. 2010. Vol. 6. P. 537–548.

Juhlin C. Interpretation of the reflections in the Siljan Ring area based on results from the Gravberg-1 borehole. Tectonophysics. 1990. Vol. 173. P. 345–360.

Juhlin C. Appraisal of geological barriers in the upper crust based on some crystalline rock drilling projects and geophysical data: Focus on Sweden. Final Disposal in Deep Boreholes Using Multiple Geological Barriers: Digging Deeper for safety: Proceed. of the Workshop, Juni 2015. Berlin: GRS gGmbH, 2016. P. 83–106.

Laajoki K. Karelian supracrustal rocks. Lehtinen M., Nurmi P. A., Ramo O. T. (eds.) Precambrian Geol. of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield. Amsterdam: Elsevier B. V., 2005. P. 279–342.

Litak R. K., Hauser E. C. Bagdad Reflection Sequence as tabular mafic intrusions: Evidence from seismic modeling of mapped exposures. GSA Bulletin. 1992. Vol. 104(10). P. 1315–1325.

Mandler H. A. F., Clowes R. M. Evidence for extensive tabular intrusions in the Precambrian shield of western Canada: A 160-km-long sequence of bright reflections. Geology. 1997. Vol. 25(3). P. 271–274.

Mandler H. A., Clowes R. M. The HSI bright reflector: Further evidence for extensive magmatism in the Precambrian of western Canada. Tectonophysics. 1998. Vol. 288(1–4). P. 71–81.

Mitchell R. H., Bergman S. C. Description of lamproite: Occurrences, distribution, age, characteristics, and geological framework. Petrology of Lamproites. Ch. 3. New York: Springer Science+Business Media, 1991. P. 39–102.

Muirhead J. D., Airoldi J., Rowland J. V., White J. D. L. Interconnected sills and inclined sheet intrusions control shallow magma transport in the Ferrar large igneous province, Antarctica. Geol. Soc. Am. Bull. 2012. Vol. 124(1–2). P. 162–180.

Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the eastern and northern Finland. Eds. J. I. Vuollo, Zh. A. Fedotov. Dyke swarms – time markers of crustal evolution: Fifth International Dyke Conference (31 July – 3 August 2005, Rovaniemi, Finland). Post-conference Field Trip. Guidebook: Eastern and Northern Finland – Belomoride Mobile Belt and Kola Peninsula. Part 1. 2005. 84 p.

Papasikas N., Juhlin C. Interpretation of reflections from the central part of the Siljan ring impact structure based on results from the Stenberg-1 borehole. Tectonophysics. 1997. Vol. 269, no. 3–4. P. 237–245.

Pekkarinen L. J., Lukkarinen H. Paleoproterozoic volcanism in the Kiihtelysvaara – Tohmajärvi district, eastern Finland. *Geol. Survey of Finland*. 1991. Bull. 357. 30 p.

Ross G. M., Eaton D. W. Winagami reflection sequence: Seismic evidence for postcollisional magmatism in the Proterozoic of western Canada. *Geology*. 1997. Vol. 25. P. 199–202.

Sorjonen-Ward P. Structural and hydrothermal event history of the Koli-Kaltimo-Eno region – a preliminary regional framework. *GTK Report CM 60/2006/3*. 16 p.

Stephens T. L., Walker R. J., Healy D., Bubeck A., England R. W., McCaffrey K. J. W. Igneous sills record far-field and near-field stress interactions during volcano construction: Isle of Mull, Scotland. *Earth and Planetary Science Letters*. 2017. Vol. 478. P. 159–174.

Vuollo J., Piirainen T. The 2.2 Ga old Koli layered sill: The low-Al tholeiitic (karjalitic) magma type and its differentiation in northern Karelia, eastern Finland. *Geologiska Föreningen i Stockholm*

Förhandlingar. 1992. Vol. 114(1). P. 131–142. doi: 10.1080/11035899209453466

Welford J. K., Clowes R. M. Deep 3-D seismic reflection imaging of Precambrian sills in southwestern Alberta, Canada. *Tectonophysics*. 2004. Vol. 388. P. 161–172.

Welford J. K., Clowes R. M. Three-dimensional seismic reflection investigation of the upper crustal Winagami sill complex of northwestern Alberta, Canada. *Geophys. J. Int.* 2006. Vol. 166. P. 155–169.

Welford J. K., Hearn E. H., Clowes R. M. Possible role of midcrustal igneous sheet intrusions in cratonic arch formation. *Tectonics*. 2007. Vol. 26(5). TC 5012. doi: 10.1029/2006TC002023

Welin E., Lundqvist T. New Rb-Sr Age Data for the Sub-Jotnian Volcanics (Dala Porphyries) in the Los-Hamra Region, Central Sweden // *Geologiska Föreningen i Stockholm. Förhandlingar*. 1970. Vol. 92(1). P. 35–39.

Received May 26, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Кулаковский Алексей Львович

старший научный сотрудник
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН
ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, Россия, 123242
эл. почта: akulakovskij@mail.ru

CONTRIBUTOR:

Kulakovskiy, Aleksey

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy
of Sciences
10, bldg. 1, Bolshaya Gruzinskaya St., 123242 Moscow, Russia
e-mail: akulakovskij@mail.ru

УДК 55 (474.2) + 550.4

GEOLOGY AND GEOCHEMISTRY OF A PALEOPROTEROZOIC IRON MINERALIZATION IN NORTH-EASTERN ESTONIA

S. Nirgi^{1,2}, A. Soesoo^{2,3}

¹ *Geological Survey of Estonia, Rakvere, Estonia*

² *Institute of Ecology and Earth Sciences, Department of Geology, University of Tartu, Estonia*

³ *Institute of Geology, Tallinn University of Technology, Estonia*

The Estonian Precambrian basement is considered as a southern continuation of the Fennoscandian Shield of the East European Craton. Magnetite and sulphide mineralization is historically known in the Jõhvi structural zone, North-eastern Estonia. The mineralized beds are subvertical, with complicated internal structural outlines and a large range of rock types. The newly presented data of 1700 structural measurements and 110 geochemical samples are based on the analysis of two new inclined boreholes drilled in 2019–2020. Magnetite occurs as anhedral grains elongated along the rock fabric, as rounded inclusions in other minerals, or as tiny platelets along grain edges and along cleavage planes of amphibole and biotite. Sulphides are present as pyrite, pyrrhotite in addition to minor chalcopyrite, arsenopyrite and iron arsenide – loellingite, galena and sphalerite. Loellingite and arsenopyrite are commonly related to quartz-feldspar veining. Several samples show elevated Au content (up to 205 ppb), which is often observed in magnetite-sulphide mineralized beds, but sometimes in surrounding garnet gneisses as well. The study reveals unusually high manganese contents of 0.2–13.6 wt% in a number of mineralized samples and occasionally in the surrounding gneisses. The new drill core data support the understanding that the Jõhvi Zone is geologically similar to Bergslagen in Sweden and possibly to Orjjarvi in southern Finland.

Key words: geochemistry; iron- and sulphide mineralization; Precambrian basement; Jõhvi zone; Estonia.

С. Нирги, А. Соэсоо. ГЕОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙ- СКОГО ЖЕЛЕЗИСТОГО КОМПЛЕКСА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЭСТОНИИ

Приводятся новые данные по исследованию геологии фундамента Эстонии, сложенного докембрийскими образованиями в южной части Восточно-Европейского кратона Фенноскандинавского щита. Основу материалов составляют результаты по скважинам бурения 2019–2020 гг. В проведенном анализе использованы данные 1700 структурных измерений и данные по 110 геохимическим пробам. Установлены субвертикальные минерализованные пласты со сложными структурными особенностями и различными типами докембрийских пород. Минералогические особенности выражены в том, что магнетит встречается в виде вытянутых вдоль ткани породы двугранных зерен, округлых включений в других минералах или в виде крошечных пластинок по краям зерен и вдоль плоскостей спайности амфибола и биотита. Отмечено, что оруденение представлено магнетитом и сульфидами. Сульфиды присутствуют в виде пирита, пирротина в дополнение к незначительному содержанию халькопирита, леллингита, галенита и сфалерита. Арсенипирит

обычно связан с кварц-полевошпатовыми прожилками. Установлено необычно высокое содержание марганца – от 0,2 до 13,6 мас. %. Новые данные, полученные по керновым пробам из пробуренных скважин, свидетельствуют, что зона Йыхви имеет геологическое сходство с районом Бергслеген в Швеции и, возможно, областью Ориярви в Южной Финляндии.

Ключевые слова: геохимия; железо-сульфидное оруденение; докембрий; фундамент; зона Йыхви; Эстония.

Introduction

The Estonian Precambrian basement can be considered as a southern continuation of the Svecofennian province of the East European Craton [Bogdanova et al., 2015 and references therein] (Fig. 1, a). This basement comprises two major units: amphibolite facies rocks of northern Estonia, which are similar to the rocks of southern Finland, and mostly granulite facies rocks of southern Esto-

nia. Based on geophysical and petrological studies, six structural zones can be distinguished within these major units: the Tallinn, Alutaguse, and Jõhvi zones in northern Estonia, and the West Estonian, Tapa, and South Estonian zones in southern Estonia [Puura et al., 1983; Soesoo et al., 2004, 2006, 2020] (Fig. 1). Since the crystalline rocks are covered by 100–700 m thick, mostly Paleozoic-age sedimentary rocks, geological information on Proterozoic crystalline rocks in Estonia comes mostly

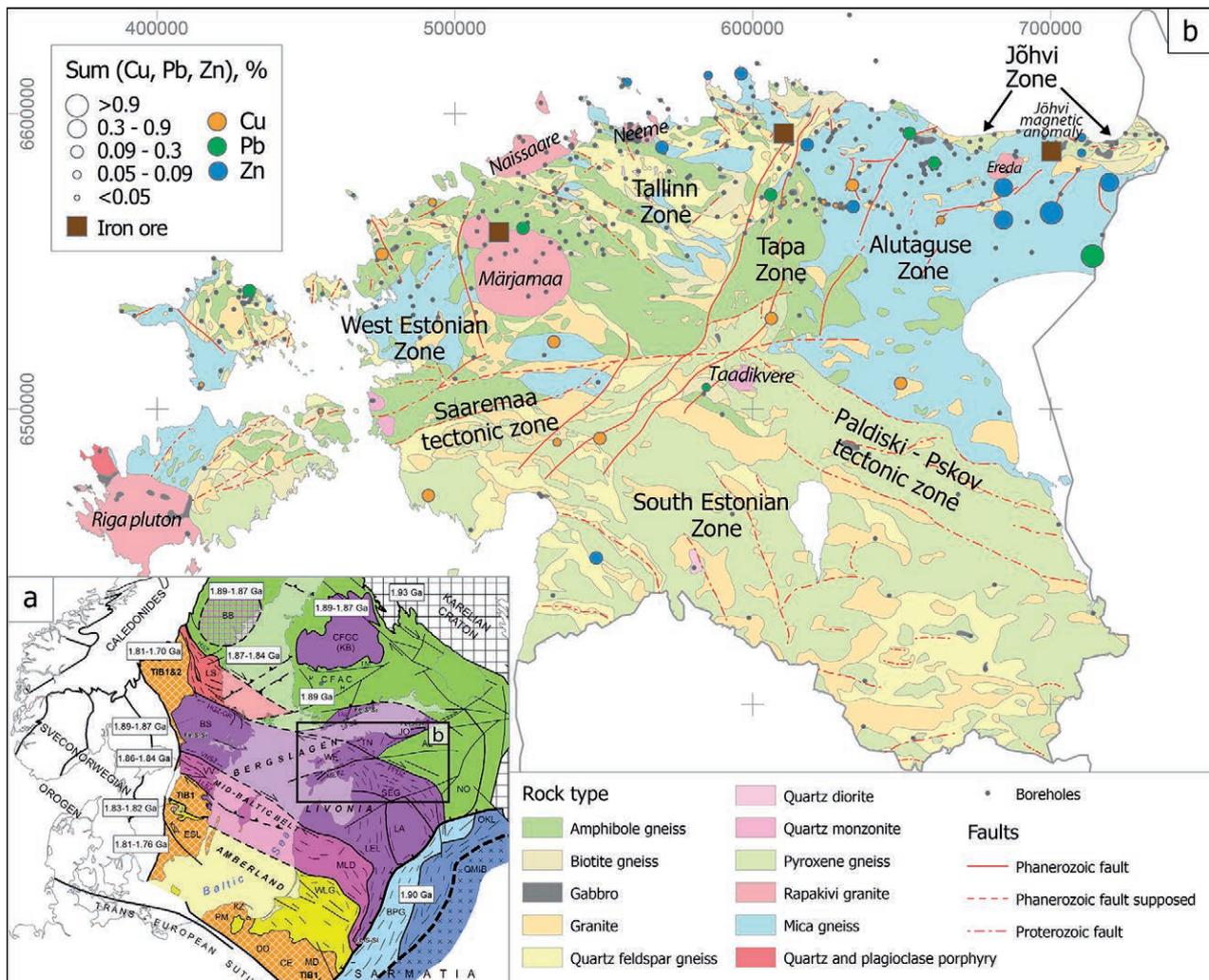


Fig. 1. Estonian crystalline basement in the context of the Svecofennian orogen zones in the neighbouring area (a) and base metal occurrences on the geological map of the Paleo- and Mesoproterozoic crystalline basement of Estonia (b) [Bogdanova et al., 2015]

from studies of drill core material and geophysical studies. During the 1950s – 1980s, Estonian basement rocks were extensively drilled and mapped and studied for metals. From the metallogenetic point of view, several regions were proposed including the Jõhvi – Uljaste sidero-chalcophilic area in NE Estonia (Fig. 1, b).

Several magnetic anomalies were established from which the most striking was the Jõhvi Magnetic Anomaly, initially discovered already in 1924. The anomaly is situated a few kilometres north of Jõhvi Town in NE Estonia, within the Jõhvi structural zone. The first two boreholes were drilled during 1937–1939 down to depths of 505 (J-1) and 721 m (J-2). During the Soviet era, several exploratory holes were drilled. However, most of the research stopped in the 1980s. None of these drill cores (from 18 drill holes altogether) except J-1 and J-2 have been preserved.

Based on the information which is more than 40 years old, it was established that the Jõhvi magnetite-bearing layers (previously called magnetite quartzites) occur as subvertical beds in garnet-cordierite and pyroxene gneisses. Earlier drillings showed that the complex of ore-bearing gneisses was up to 100 m thick, and the reserves of iron ore (Fe over 25 %) were about 355 million tons (calculated to a depth of 500 m), or 629 million tons if calculated to a depth of 700 m and 1500 million tons if calculated to a depth of 1000 m [Soesoo et al., 2020, 2021a, b]. These estimates, however, are based on very limited data and need to be verified by detailed drilling in the future. During 2019–2020, two new holes were drilled down to 770 m into the centre of the western part of the Jõhvi Magnetic Anomaly. These drill cores have now been studied in detail and some of the new results are reported in this article.

Geological settings of the Jõhvi Zone

The narrow, about 20–30 km wide and 100 km long Jõhvi Zone in NE Estonia, is separated from the South Estonian Zone by the Alutaguse Zone amphibolite grade gneisses (Fig. 1). The zone is characterized by strong E–W trending magnetic anomalies and positive gravity anomalies [Soesoo et al., 2004, 2020]. The Jõhvi Magnetic Anomaly is characterized by the occurrence of extremely strong, up to 19.300 nT E-W trending magnetic anomalies with accompanying slightly positive gravity anomalies [Plado et al., 2020].

The Jõhvi complex mainly consists of pyroxene gneisses and inter-layered quartz-feldspathic gneisses, biotite-plagioclase gneisses, amphibole gneisses, garnet-cordierite gneisses (Vaivara complex), and magnetite-rich gneisses [Jõh-

vi Magnetic Anomaly; Puura et al., 1983, 2004; Soesoo et al., 2004, 2006, 2020, 2021a]. Migmatization within the complex is widespread, resulting in the formation of veins and small bodies of rocks with granitic, charnockitic and enderbitic compositions. Generally, these rocks have formed under the conditions of granulite facies metamorphism [Puura et al., 2004; Soesoo et al., 2004, 2006, 2020]. The Jõhvi magnetite-rich layers occur as subvertical beds with complicated structural elements in garnet-cordierite and pyroxene gneisses. Seven historical drill cores out of 18 from the Jõhvi Magnetic Anomaly area contain magnetite-rich layers. Previously, three different magnetic partial anomalies were detected, which were considered as an indication of the occurrence of possible ore mineralization zones (Fig. 2).

Historical drilling and geophysical survey results confirmed the presence of iron ore mineralization at a depth of a few hundred metres in all the partial anomalies, but the size, geometry and continuation of the mineralized zones remained unknown. Puura & Koppelmaa [1967] assumed that the total thickness of the mineralized section could be between 260–400 m and that at least two 100 m thick mineralized sections, strata dipping steeply south-east, were separated by aluminiferous gneisses (Fig. 2).

Several hypotheses about the possible deposit type of the mineralization of the Jõhvi Magnetic Anomaly have been proposed. Linari [1940] believed that the magnetite mineralization was similar to skarn deposit types, while Vaganova & Kadyrova [1948] proposed a metasomatic origin. Tikhomirov [1966] described these rocks as alternating layers of skarn, biotite, and hornfels cut by granite veins. However, the most common is the concept of metamorphism after volcanic sedimentary rock genesis [Puura, Kuuspalu, 1966; Erisalu, Arvisto, 1969]. Based on the magnetite composition, Soesoo et al. [2021a] show that Jõhvi magnetites do not represent clearly any of the common deposit types compared to the results of Dupuis and Beau-doin [2011]. However, it may be that the studied magnetites bear similarities to the skarn type of deposits, albeit having lower nickel and higher manganese concentrations. The analysed magnetites also have a high Ti + V concentration, which is not common for typical skarn deposits [Soesoo et al., 2021a]. Therefore, the genesis of the Jõhvi ore complex is still an open question.

Historically, the term “magnetite quartzite” has been extensively used for the magnetite-rich variety of Jõhvi gneisses and is still used by some authors. In the case where magnetite and quartz with a minor amount of other minerals (garnet, micas, feldspars) form micro-layered rock asso-

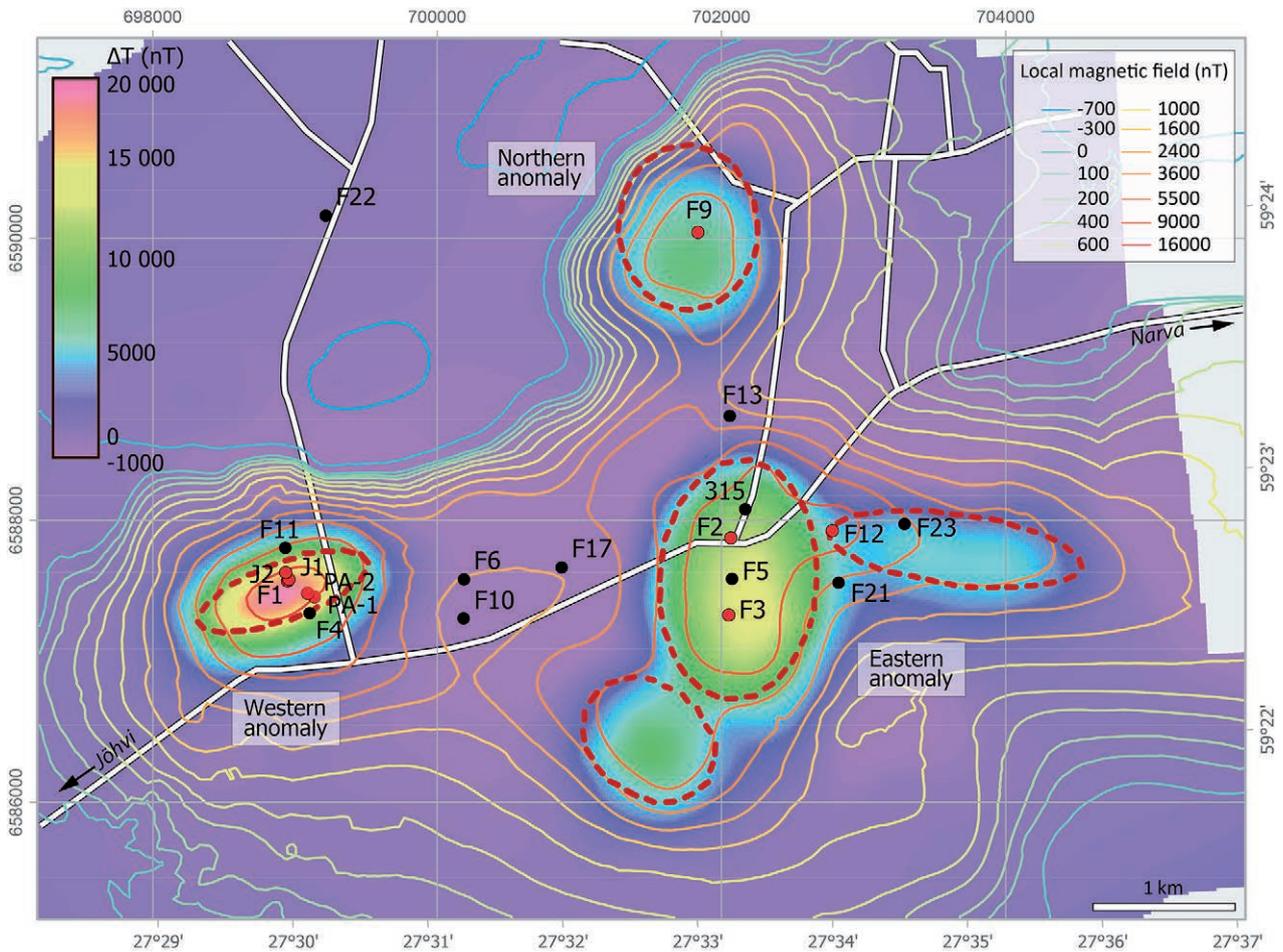


Fig. 2. The Jõhvi Magnetic Anomaly with five elliptic cylinders (red dashed lines) showing the surface projection of the modelled orebodies indicated by the partial anomalies. Locations of boreholes are shown as dots, where red colour indicates the occurrence of magnetite-rich gneiss. Modified from [Plado et al., 2020]

ciations e. g., Banded Iron Formations, this term accurately characterizes the rock type. Although the mineralization in Jõhvi rocks could originate from the previously formed iron-rich sedimentary formation, including magnetite quartzites, the metamorphic processes have resulted in foliated rocks that should be considered as gneisses.

By mineralogy, the British Geological Survey defines quartzite as psammites containing more than 80 % quartz [Robertson, 1999], while the US Geological Survey describes it as a rock containing > 75 % quartz [North..., 2004]. The term “quartzite” is also used for quartz-cemented quartz arenites. In the case of Jõhvi rocks, the term “magnetite quartzite” is somewhat misleading as discussed by Soesoo et al. [2021a]. The studied magnetite-rich rocks are gneisses containing plagioclase (up to 35 %), other feldspars, pyroxenes (up to 20 %), garnet and sulphide ore minerals along with magnetite and hematite. In this article, we use the term magnetite-gneisses instead.

Material and methods

The data presented here is based on the analysis of two new inclined boreholes drilled in 2019 and 2020. The drilling program was conducted by the Geological Survey of Estonia to gain new oriented core material in order to assess the potential of the iron occurrence and verify the historical interpretation of the magnetic body in the western part of the Jõhvi Magnetic Anomaly. Based on the interpretation of the magnetometric studies [Plado et al., 2020], two 770 m long boreholes with an azimuth of 258° and dip angle of 58° were drilled to intersect the magnetic body.

Drill cores were described, and mineralized intervals were distinguished using comprehensive data collected from the borehole and the drill core e. g., borehole geophysical logging results, dry bulk density and magnetic susceptibility of core samples, handheld XRF (X-Ray fluorescence spectrometer) logging results and XRD

(X-Ray diffraction) analysis together with thin sections. In addition, more than 1700 measurements of the structural features like schistosity planes of the gneisses, granitic vein directions, and natural fracture surface planes were carried out using a core goniometer.

For the geochemical analysis, comprehensive QA/QC procedures were followed during sampling and an accredited commercial laboratory was contracted to report the results according to the international reporting standards. We analysed 110 quarter core samples using lithium metaborate or sodium peroxide fusion together with ICP-MS or ICP-OES analysis for major and trace elements and fire assay analysis for precious metals (Au, Pt, Pd). Magnetite content in the samples was determined by Satmagan analysis. Sample preparation and analysis were carried out in Actlabs, Canada, performing the following analytical packages – WRA ICP 4B, Ultratrace 7, 1C-Exploration and Satmagan Test [Actlabs, 2021].

For a more detailed description of specific features in mineralized intervals, scanning electron microscope (SEM) imaging using a variable pres-

sure Zeiss EVO MA15 SEM equipped with Oxford X-MAX energy dispersive detector system (EDX) and AZtec software for element analysis was performed at the University of Tartu.

Structural features of the Jõhvi Zone

Characterization of structural features in the crystalline section of the Jõhvi boreholes is based on visual examination and goniometer measurements of the oriented drill cores. The results of 167 individual measurements of schistosity planes were converted to true angles using the downhole survey data and plotted on stereographic nets. The structural data of schistosity planes were mainly collected from mineralized sections of the drill core.

The distribution of dip angle measurements shows that the schistosity of the mineralized rock is subvertical, thus confirming the historical interpretation of the dipping directions, which were described mainly based on geophysical interpretations. However, the dip azimuth (Fig. 3) of the mineralized sections is not very well defined towards

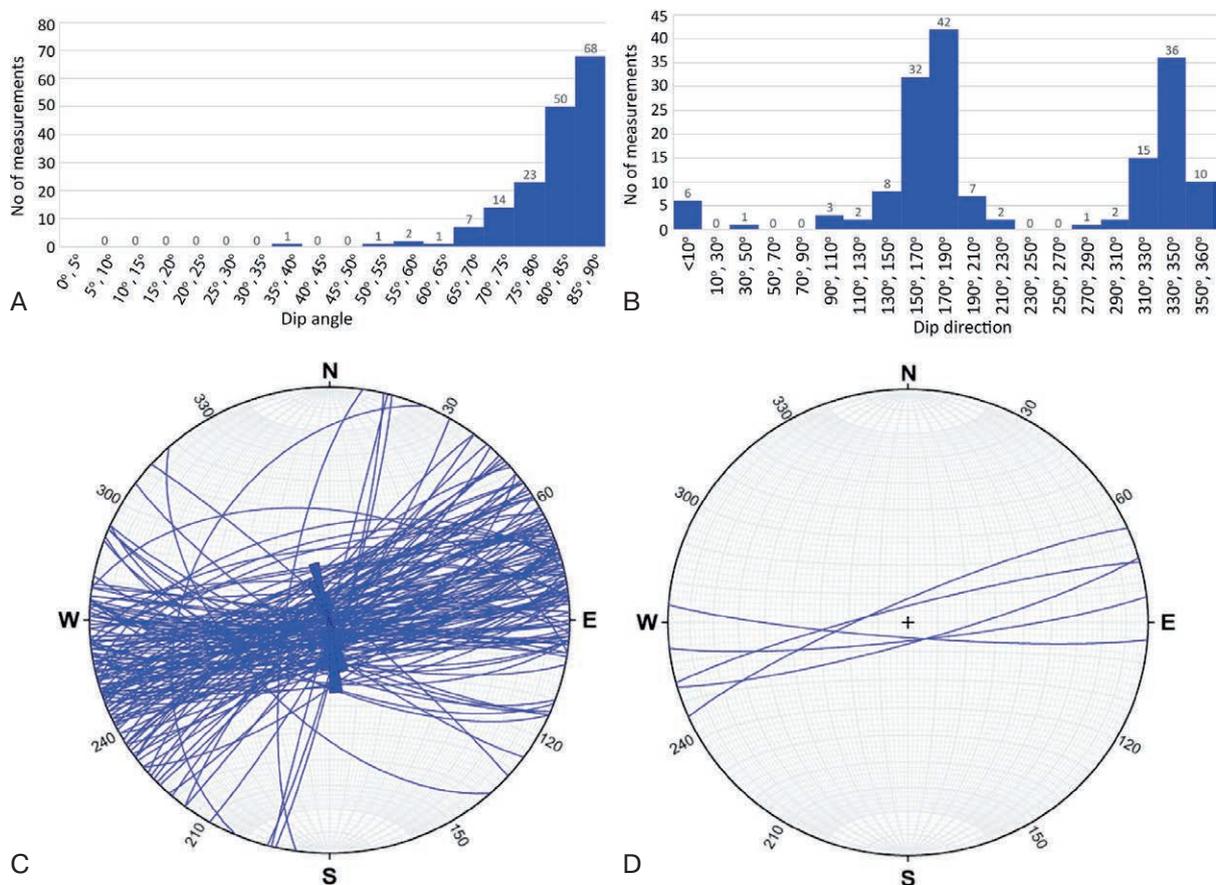


Fig. 3. Structural planes of schistosity in the mineralized sections in boreholes PA-1 and PA-2. A) Distribution of the dip angle; B) Distribution of the dip azimuth; C) All measured planes (167) plotted on stereonet together with a rose plot showing the distribution of the dip angle measurement results; D) Predominant planes plotted on stereonet

the south. The dipping angle of schistosity commonly varies between and sometimes within separate rock intervals. However, the main dip directions point to southern and northern sections, possibly indicating the N-S compression direction of folding.

Main rock types of the Jöhvi drill cores

Based on the detailed study of two new drill cores (PA-1 & PA-2), a number of rock types can be distinguished within ca 500 m crystalline rock section (Fig. 4). Rock types include amphibole-biotite-, garnet-amphibole-, pyroxene-amphibole-, biotite- and biotite-feldspar-, garnet-biotite- and garnet-biotite-feldspar-, biotite-feldspar-alumogneisses, pyroxene-, amphibole-, garnet-, garnet-biotite-plagioclase-gneisses, magnetite-gneisses, and granitic veins and larger intrusions cutting through the complex.

Amphibole-gneisses are one of several rock types that host magnetite mineralization (Tab. 1, Fig. 4). According to XRD and thin section studies, amphibole gneisses contain up to 35 % magnetite with an average of 24 % in the studied 19 samples.

Biotite-amphibole gneisses are commonly slightly migmatized. The rock comprises amphi-

bole (mainly hornblende, 20 % on average), quartz (17–46 %), K-feldspar (2–12 %), and magnetite. Biotite (4 % on average) and fine-grained garnet can also be observed. Generally, fine-grained magnetite is common (11–28 %), however, there also occur semi-massive aggregates. Visible aggregates of iron sulphides (pyrite or pyrrhotite) are present. Although pyroxene and/or garnet can dominate the lithology composition over short interval distances, the biotite concentration is more uniform and consistent throughout the drill core.

Garnet-amphibole gneisses are fine to medium-grained, slightly migmatized, foliated, black or reddish-black rocks. Garnet and magnetite are abundant as fine grains with an average concentration of 11 and 15 %, respectively. In addition, quartz (10–50 %), pyroxene (up to 10 %), K-feldspar, plagioclase and biotite occur in these rocks.

Pyroxene-amphibole gneisses are similar to garnet-amphibole gneisses. Although they have been described in historical boreholes F1 and J-1, they were not identified in the new boreholes PA-1 and PA-2. Compared to other amphibole-gneisses, quartz, as well as magnetite content (30–67 and 12–35 %, respectively), are higher in pyroxene-amphibole gneisses. The pyroxene content varies from 4 to 10 % and garnet from 2

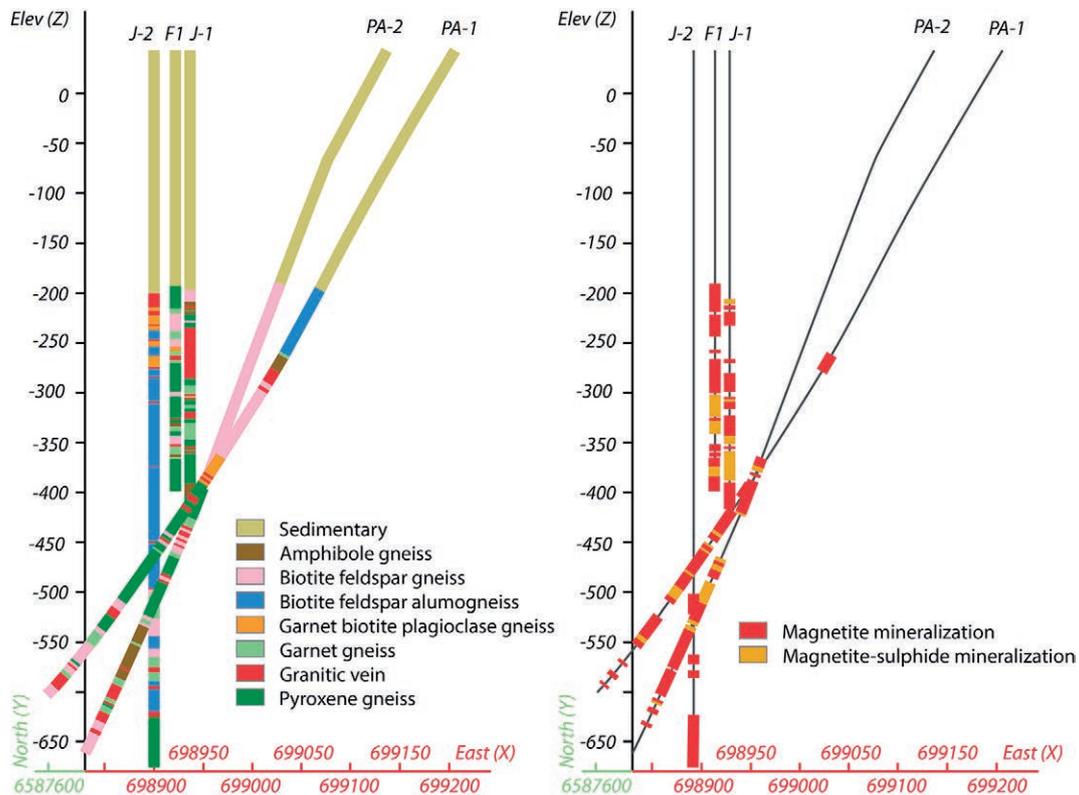


Fig. 4. Sketch map of historical (J-1, J-2, F1) and recent (PA-1, PA-2) boreholes drilled into the western part of the Jöhvi Magnetic Anomaly. Showing the main rock types (left) and magnetite and magnetite-sulphide mineralized sections (right)

Table 1. Summary of significant layers with high iron content (as Fe₂O₃) of the drill cores PA-1 and PA-2. Rock types and mineralization intervals can be followed in Fig. 4

Borehole	Mineralized layer, m	True thickness, m	Fe ₂ O ₃ (wt%)		Rock type
			Min	Max	
PA-1	346.95–367.03	10.04	24.11	34.00	Grt-Amp gneiss
	506.02–517.10	6.25	42.11	44.67	Grt-Px gneiss
	534.90–570.37	12.13	22.63	43.69	Grt-Px gneiss
	576.69–646.64	23.92	30.81	52.80	Grt-Px gneiss
	666.54–682.26	5.38	34.11	38.72	Grt-Px gneiss
	683.63–701.98	6.28	20.98	32.09	Px-Grt gneiss
	725.25–727.10	0.63	29.92	45.90	Mag gneiss
	738.80–743.21	1.51	29.83	34.08	Px-Grt gneiss
Total true thickness		66.14			
PA-2	443.65–456.88	4.52	34.10	45.70	Grt-Px gneiss
	467.70–503.53	12.25	26.93	42.44	Grt-Px gneiss
	552.60–571.35	4.85	26.17	56.59	Px and Grt-Px gneiss
	578.92–624.85	11.89	25.21	48.78	Grt-Px gneiss
	626.70–693.40	17.26	21.86	47.23	Bt-Amp gneiss
	717.70–723.32	1.45	22.46		Amp-Grt gneiss
Total true thickness		52.22			

Note. Grt – garnet; Amp – amphibole; gn – gneiss; Px – pyroxene; Mag – magnetite; Bt – biotite.

to 17 %. However, pyroxene occurs more consistently in the lithology.

Biotite-feldspar gneisses are generally strongly migmatized, with K-feldspar and plagioclase present as porphyroblasts (up to 43 and 16 %, respectively). Quartz content is usually below 20 %. Chlorite, pyroxene, cordierite, and apatite may also be present. The biotite is fine-grained and foliated, while the coarse-grained feldspars commonly have a porphyroblastic texture.

Biotite-quartz-feldspar gneisses are generally strongly migmatized. The main minerals forming the rock are K-feldspar (28–67 %), plagioclase (12–33 %), quartz (4–36 %), biotite (3–10 %), garnet (1–2 %), and chlorite (0.5–4 %). In new boreholes, bleaching halos are visible in the margins of joints (408 to 420 m in PA-1, 288.5 to 295 m in PA-2). Magnetite dissolution and hematite formation have also been described by Soesoo et al. [2021a].

Garnet-biotite-feldspar gneisses are commonly strongly migmatized, fine to coarse-grained and foliated rocks. Along with coarse-grained K-feldspar crystals, fine- to medium-grained garnet can also be observed. In places, garnet forms aggregates up to several centimetres in diameter. The main rock-forming minerals are K-feldspar (3–87 %), biotite (4–22 %), garnet (up to 37 %), plagioclase, amphibole, cordierite, sillimanite, chlorite, and calcite. Large sulphide mineral and magnetite aggregates are found in several locations in both boreholes.

Garnet-biotite gneisses have only been described in historical boreholes J-1, J-2 and F1. Garnet-biotite-gneiss is strongly migmatized and biotite-rich, and may in addition to garnet contain magnetite. In PA-1 and PA-2, feldspar is always present in garnet- and biotite gneisses.

Alumogneisses (aluminiferous gneisses) were logged as separate rock types in contrast to biotite- and biotite-feldspar gneisses due to the distinctive abundance of aluminium-rich minerals such as cordierite, sillimanite, and andalusite.

Biotite-feldspar alumogneisses are generally medium-grained, moderately foliated, dark-coloured rocks. As PA-1 intersects the biotite-feldspar alumogneisses from the surface of the crystalline rocks, distinct reddish and yellowish colours caused by hematization can be observed. These gneisses have a varying mineral composition of K-feldspar (6–60 %), plagioclase (10–45 %), quartz (17–70 %), biotite (8–15 %), and aluminiferous minerals (sum of cordierite, sillimanite, and andalusite > 10 % on average). Some graphite, muscovite, apatite, monazite, zircon, pyrite, and magnetite grains may be present. These rocks are moderately or strongly migmatized. Bands of coarse-grained K-feldspar together with quartz are common. Thin hairline veins and fractures filled with clay minerals, calcite, or fine-grained quartz occur in the upper part of drill core PA-1. According to their characteristics, aluminium-rich gneisses can be classified as paragneisses produced from a clay-rich and sand-rich sedimentary protolith.



Fig. 5. Garnet porphyroblasts in garnet-biotite-plagioclase gneiss together with calcite and chlorite veins

Garnet-biotite-plagioclase gneisses are variably migmatized, dark-purple-grey in colour and mottled; they are foliated and generally porphyroblastic rocks. Medium to very coarse porphyroblasts of garnet are noted. Garnet is usually anhedral, sometimes elongated, and contains inclusions of magnetite, zircon, quartz, galena, and monazite. Inclusions commonly form helical trails (“snowball structures”) suggesting that the porphyroblasts have enclosed adjacent minerals from the matrix as they grew. In places, garnet grains can be aggregated to bands several centimetres thick. The main rock-forming minerals are plagioclase (17–52 %), quartz (5–37 %), biotite (10–48 %), garnet (up to 8 %), chlorite (2–6 %), calcite, and amphibole. Anastomosing carbonate veining, feint conjugate hairline calcite veinlets and related chloritization are observed in several intervals (Fig. 5).

Amphibole-garnet gneisses are fine to medium-grained, dark red, moderately foliated rocks that can be cut by thin single carbonate and sulphide (pyrite and pyrrhotite) veins. In addition to garnet (up to 45 %), amphiboles (up to 30 %), and quartz (up to 60 %) are the dominant minerals. Lesser amounts of pyroxene, biotite, K-feldspar, pyrite, and pyrrhotite occur in this rock. Garnet-gneisses are mainly fine-grained brownish foliated rocks consisting predominantly of garnet (up to 62 %) and quartz (up to 65 %). Plagioclase, biotite, pyrite, pyrrhotite, and magnetite may also occur. In several cases, medium to coarse (> 2 mm) sized pyrite and pyrrhotite grains are observed.

Pyroxene-garnet gneisses and pyroxene gneisses are two of the major rock types hosting magnetite mineralization (Tab. 1). Generally, they are dark-red or black, foliated, fine- to medium-grain rocks with variable mineralogy of magnetite (up to 30 %), garnet, pyroxene, amphibole, feldspar, quartz, pyrite, and pyrrhotite. While

the magnetite grains are fine, the pyrite and pyrrhotite occur as medium-size grains with some rare occurrences of large semi-massive aggregates. Single hairline calcite veins cut through the rocks in several places. In addition, pyrite, pyrrhotite, siderite, apatite, calcite, biotite, chlorite, and plagioclase have been described in thin sections.

Pyroxene-containing gneisses are generally medium-grained dark rocks that coincide often with garnet-pyroxene gneisses but contain more quartz (occasionally up to 72 %), less than 5 % garnet, and cordierite and K-feldspar can be present. Along with magnetite, pyrrhotite and pyrite can be seen. Migmatization is rare in pyroxene-gneisses. Pyrite and pyrrhotite are also found in the thin veins cutting the core and on the surfaces of fractures as thin mineral films.

Magnetite-quartz gneisses are described in only two metres of both drill cores. The rock is strongly migmatized, coarse-grained, black and grey in colour, and consists mostly of magnetite, quartz, and plagioclase. The rock is often cut by thin carbonate veins.

Magnetite and sulphide minerals can be found sporadically in all the described rock types. Yet, continuous mineralization, which is also a subject for mineral exploration, is related to certain rock types e. g., garnet-pyroxene, pyroxene-garnet, pyroxene gneisses, or to a lesser extent, garnet-amphibole, amphibole-garnet and biotite-amphibole gneisses. In boreholes PA-1 and PA-2, mineralized layers were identified using the logging results of magnetic susceptibility, dry bulk density and handheld XRF together with laboratory geochemical and mineralogical analysis (Tab. 1). For every mineralized layer distinguished, the true thickness was calculated using the apparent thickness of the mineralized layer and the angle between the schistosity planes and the long axis of the drill core.

Main ore minerals in the Jöhvi drill cores

Ore mineral microscopy study in reflected light has been published in a previous study [Soesoo et al., 2021a]. The study used several ore mineral features such as reflectivity, apparent colour, bireflection, anisotropy, and internal reflections. In the Jöhvi drill cores, optically isotropic magnetite occurs as anhedral grains elongated along rock fabric, interstitially filling the space between other minerals by forming patches of up to several millimetres in size or embedded in silicate minerals as rounded inclusions with the size of 20–100 μm . In addition, magnetite can also be found as tiny platelets along grain edges and cleavage planes of amphibole and biotite. The patches of magnetite are often oriented as distinct bands alternating with silicate mineral dominated layers. In some sections, magnetite is altered into anisotropic and bireflective hematite along grain edges,

cracks and cleavage planes [see Soesoo et al., 2021a]. In places, hematite also appears as colloform filling of 5 mm wide veins cutting subparallel to the main rock fabric and cogenetic intensive alteration of magnetite close to the veins [see figures in Soesoo et al., 2021a].

The study of the two new drill cores has confirmed that magnetite appears in a variety of types of gneisses. Magnetite (Fe_3O_4) can be found in various gneisses with different mineral assemblages. However, notable intervals with high magnetite content are usually represented by garnet-pyroxene, pyroxene-garnet, pyroxene, garnet-amphibole, garnet-biotite-feldspar, and amphibole-garnet gneisses. These rocks are commonly fine or medium-grained, in most cases manganiferous, with thin foliated beds/layers where quartz is alternating with dark minerals (Fig. 6).

Sulphide minerals often occur together with magnetite in garnet-pyroxene, pyroxene-garnet,

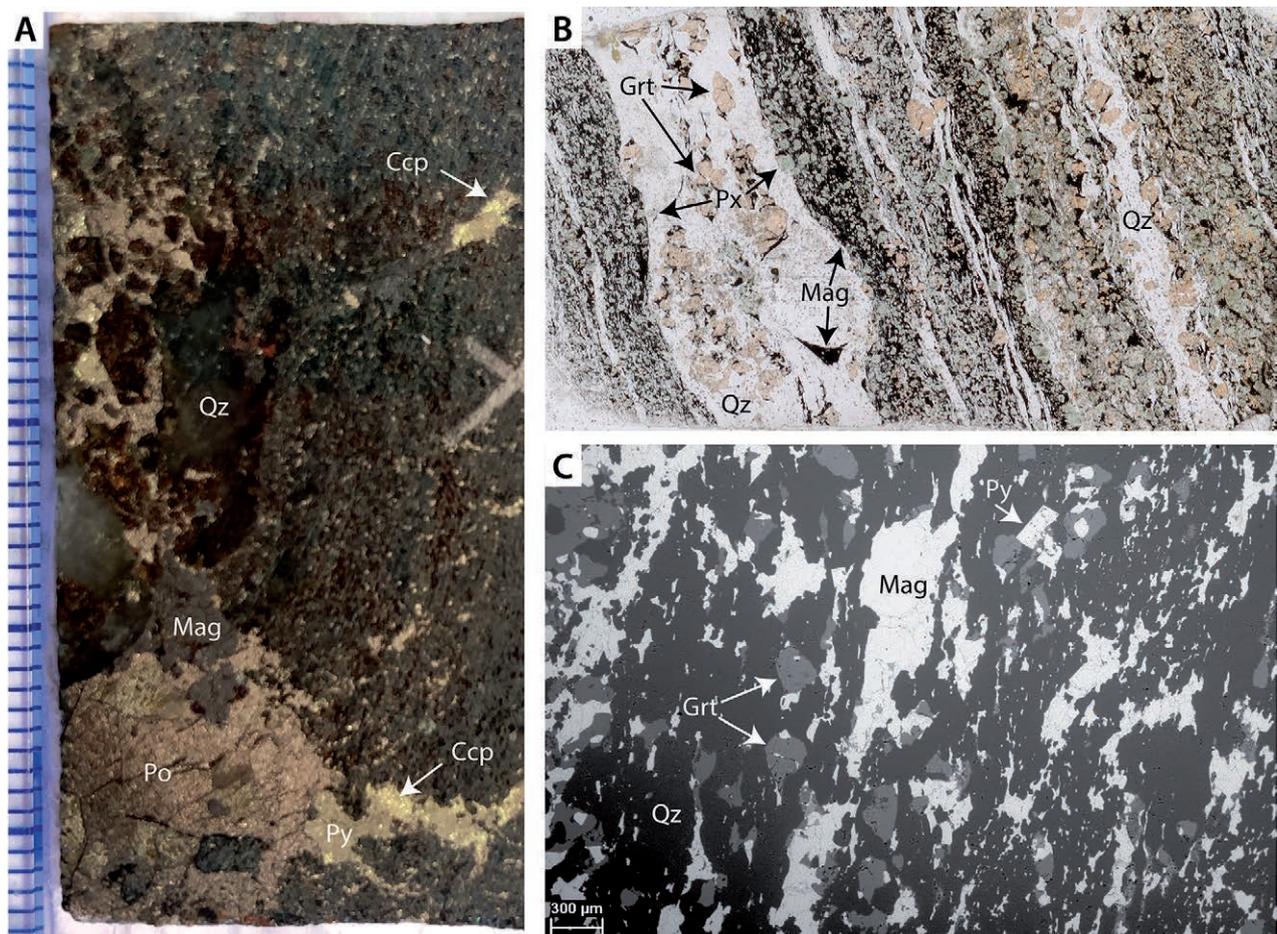


Fig. 6. A) Magnetite-sulphide mineralization in drill core PA-2 from the Jöhvi zone showing semi-massive sulphides (Po – pyrrhotite, Py – pyrite, and Ccp – chalcopyrite) and magnetite (Mag) together with fine-layered magnetite, quartz (Qz), garnet (Grt), and pyroxene (Px) gneiss with disseminated medium sulphide grains. B) Plain-polarised light photomicrograph of a foliated banded zone of magnetite, garnet, quartz, and pyroxene in a thin section from drill core F-1, Jöhvi Magnetic Anomaly. C) Scanning electron microscope photomicrograph of iron mineralization in a thin section from drill core PA-1

and pyroxene gneisses. However, sulphide mineralization can also occur in non-magnetic biotite- and biotite-feldspar gneisses and as medium to large grains or aggregates in granitic veins.

Sulphides are present mostly as anisotropic pyrrhotite ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$) and isotropic pyrite (FeS_2), which occasionally exhibits weak anisotropy levels. Pyrite appears as sub- to euhedral crystals or interstitial patches between other grains, commonly closely related to pyrrhotite, magnetite, and garnet (Figs. 7 & 8). Together with magnetite and pyrrhotite, they form ore mineral-rich bands. Brittle fracturing has occurred with pyrite, pyrrhotite, and magnetite filling the space. Pyrite and pyrrhotite also appear as fillings in later-stage cross-cutting brittle fractures. Occasional chalcopyrite, galena, and sphalerite grains were found in magnetite-rich drill core sections of historical drill cores F-1 and F-5.

In the new boreholes PA-1 and PA-2, indications of chalcopyrite (CuFeS_2), arsenopyrite (FeAsS), and iron arsenide – loellingite, FeAs_2 can be observed (Figs. 8 & 9). While the chalcopyrite appears together with pyrite and pyrrhotite, loellin-

gite and arsenopyrite seem to be commonly related to quartz-feldspar veining.

Geochemistry of the Jöarvi rock type

The analysed samples were distributed into three classes where a) magnetite mineralization (69 samples) was assigned to samples with high magnetic susceptibility, b) magnetite-sulphide mineralization (37 samples) is represented by magnetite-rich samples with macroscopically visible sulphide grains or aggregates, and c) host-rock samples (4 samples) were taken from the adjacent intervals of mineralization. As the main geochemical differences between mineralized and host-rock have been described previously [Soesoo et al., 2021a], this study focuses on the characteristics of magnetite and magnetite-sulphide mineralization. Examples of bulk sample geochemical composition showing variability between and within these mineralization classes are given in Table 2.

The SiO_2 content ranges from 24.6 to 60.4 wt% with an average of 46 wt% for all mineralized samples (Fig. 10). Iron (Fe_2O_3) content ranges from 21.0

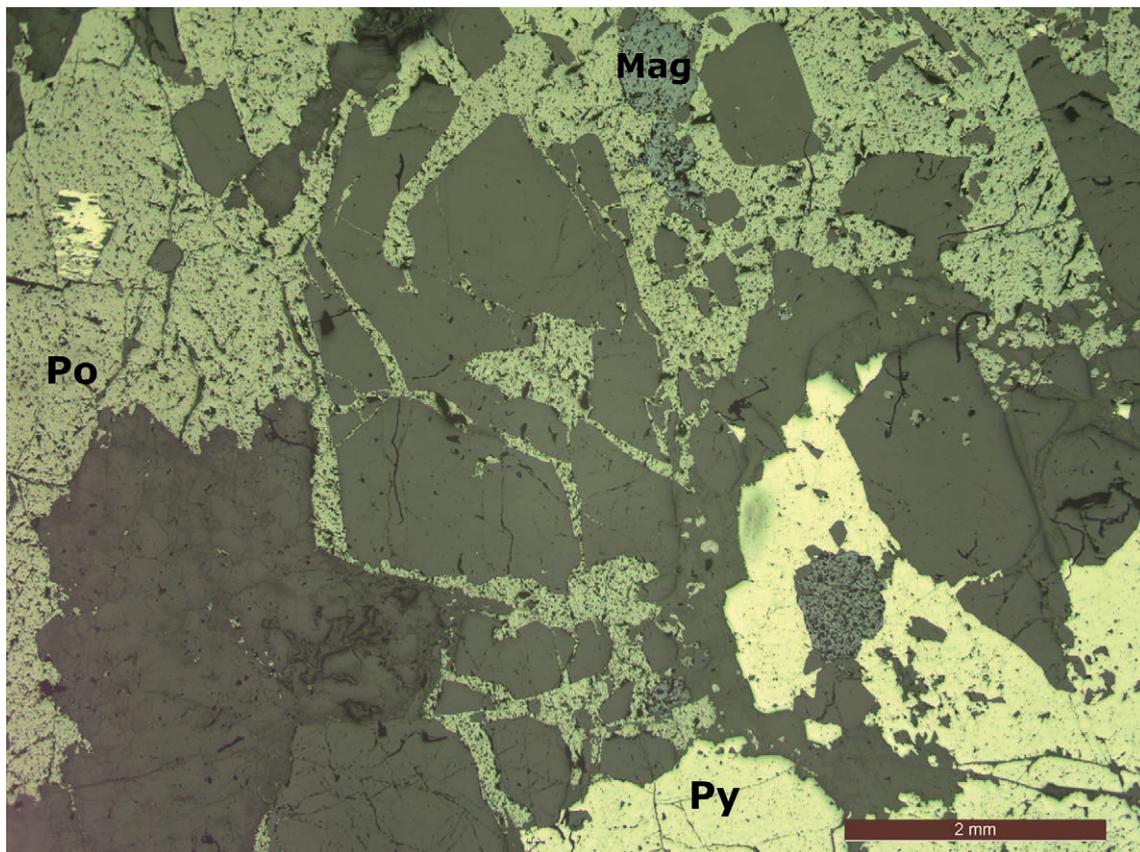


Fig. 7. Photomicrograph (in plane-polarized reflected light) of garnet-pyroxene gneiss with pyrrhotite (Po), pyrite (Py), and magnetite (Mag) filling the gaps between rock-forming minerals. Drill core PA-2, depth – 447.3 m

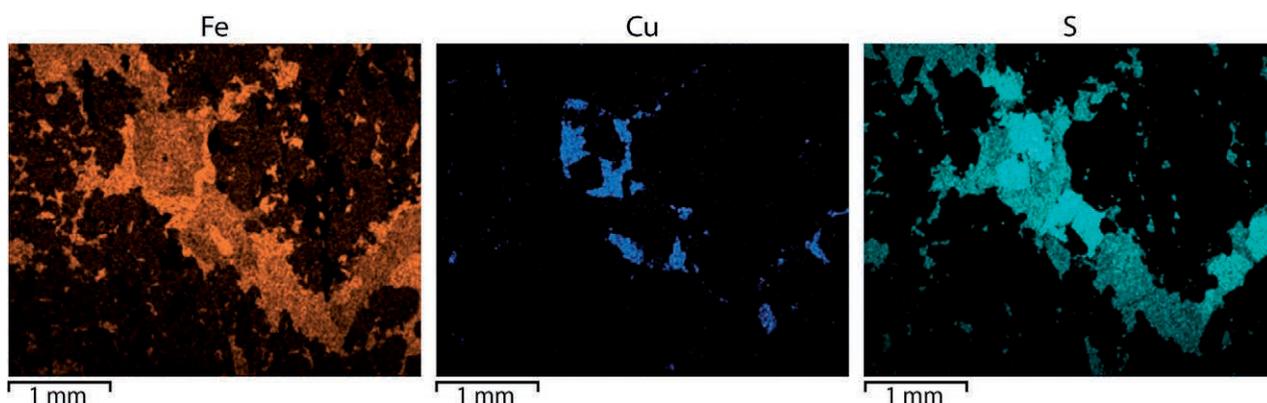


Fig. 8. Elemental mapping of Fe, S, and Cu by scanning electron microscope. Pyrite, pyrrhotite, and chalcopyrite (blue on the Cu element map) in garnet-pyroxene gneiss can be recognized in the X-ray maps. Drill core PA-2, depth 565.09–565.12 m

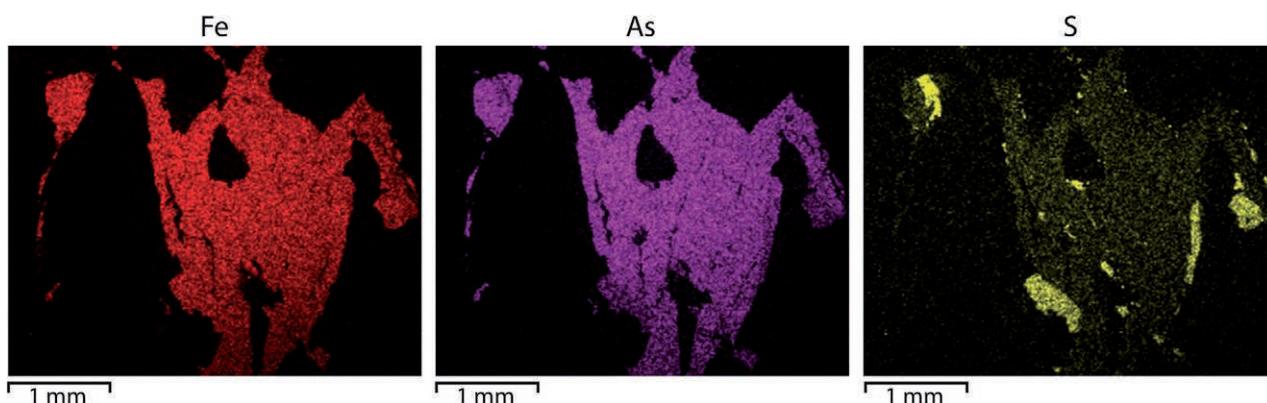


Fig. 9. Elemental mapping of Fe, As, and S by scanning electron microscope. A majority of arsenic indications are related to iron arsenide (loellingite), not arsenopyrite (yellow on the S element map).

Drill core PA-1, depth 417.67–417.74 m

to 56.6 wt%, where no clear difference between magnetite or magnetite-sulphide mineralization can be seen. Fe_2O_3 is in negative correlation with Al_2O_3 and CaO (Tab. 3). Highly variable MnO content of 0.16–13.57 wt% in all mineralized samples suggests that the mineralization occurs in different rock types, including gneisses with a remarkably high content of garnet end-member spessartine. TiO_2 content shows that magnetite mineralization can occur in gneisses of variable mineral composition (0.02–1.68 wt%), while sulphide minerals are more strictly related to the more homogeneous rocks with low TiO_2 wt% (0.008–0.42 wt%). The high concentrations are related to a specific highly migmatized magnetite gneiss interval. The average Al_2O_3 content in all magnetite and magnetite-sulphide mineralized samples are 4.84 and 3.53 wt%, respectively. CaO ranges from 1.12 to 11.97 wt% in all mineralized samples. K_2O ranges from 0.004 to 5.07 wt% for magnetite and from 0.002 to 1.85 for magnetite-sulphide mineralized samples. MgO content varies between

0.28 and 4.92 wt% for all mineralized samples. Average Na_2O content is more than twice as much in magnetite mineralized samples than in magnetite-sulphide samples (0.09 and 0.20 wt%, respectively). P_2O_5 content in all mineralized samples is generally below 0.4 wt%, albeit in three samples it was up to 3.87 wt%.

Higher concentrations of Cu (up to 3126 ppm) can be seen in magnetite-sulphide mineralized samples suggesting that some amount of chalcopyrite is present along with pyrite and pyrrhotite. Ni content in the analysed samples is rather low, ranging from 11.7 to 110.6 ppm except for one sample with 213.2 ppm. Co content in magnetite mineralized samples ranges within 13–121 ppm. However, concentrations up to 303 ppm can be seen in samples with sulphide. Similarly to Co, Cu and Sn are also in positive correlation with S and negative correlation with SiO_2 . Cr content is more variable in magnetite mineralized samples than in magnetite-sulphide samples, with concentrations of 62–440 ppm and 65–309 ppm, respectively.

Table 2. Major, trace element, and magnetite contents in different rock varieties of the Jöhrvi Magnetic Anomaly

Sample	RK-000018	RK-000025	RK-000091	RK-000011	RK-000046	RK-000108	RK-000031	RK-000128	RK-000015	RK-000023	RK-000010
Rock type	Pyrite bearing magnetite gneiss	Pyrite bearing magnetite gneiss	Magnetite pyrite garnet pyroxene gneiss	Magnetite garnet biotite amphibole plagioclase gneiss	Pyroxene garnet magnetite gneiss	Pyroxene magnetite gneiss	Garnet pyroxene magnetite gneiss	Magnetite garnet amphibole gneiss	Biotite bearing quartz feldspar gneiss	Andalusite bearing biotite feldspar gneiss	Garnet bearing biotite plagioclase gneiss
Borehole	PA-2	PA-2	PA-2	PA-1	PA-1	PA-2	PA-1	PA-2	PA-1	PA-1	PA-2
Depth, m	564.92–565.12	562.05–562.25	552.6–553.6	561.87–562.07	585.9–586.1	509.68–609.88	590.2–590.4	669.85–670.05	436.88–437.08	317.3–317.5	342.14–342.34
SiO ₂ %	28.98	33.70	44.07	39.80	24.66	44.03	40.52	46.35	77.19	67.61	59.26
TiO ₂ %	0.09	0.10	0.33	0.18	0.92	0.09	0.12	0.38	0.18	0.74	0.90
Al ₂ O ₃ %	3.09	3.07	8.81	7.02	8.33	1.99	3.14	7.35	10.98	12.58	16.22
Fe ₂ O ₃ (T) %	46.17	56.59	26.17	43.29	52.80	48.78	36.42	28.14	2.69	8.62	9.99
MnO %	6.20	2.77	7.35	0.93	3.61	0.98	8.32	6.36	0.05	0.13	0.16
MgO %	1.96	1.93	3.09	1.90	3.01	2.27	2.61	3.56	0.27	2.31	2.66
CaO %	8.60	2.46	9.20	2.34	4.11	1.43	6.99	8.12	1.45	1.11	5.62
Na ₂ O %	0.08	0.04	0.04	0.36	0.10	0.09	0.08	0.07	1.91	1.17	0.99
K ₂ O %	0.01	0.12	0.10	0.92	0.89	1.05	0.23	0.01	4.42	4.04	1.98
P ₂ O ₅ %	0.06	0.07	0.12	0.05	1.86	0.06	0.06	0.09	0.03	0.12	0.22
S %	12.65	1.71	3.26	9.06	0.56	0.04	0.78	0.01	0.30	0.03	0.79
Cu ppm	1 472.7	265.3	1 410.4	3 001.9	69.8	4.1	128.5	2.5	73.8	2.1	155.1
Ni ppm	72.1	36.6	59.5	84.5	50.2	27.9	27.2	90.1	16.6	84.5	106.3
Pb ppm	7.0	4.9	8.1	10.7	22.2	24.8	39.3	6.1	60.2	45.9	24.3
Zn ppm	110.7	219.2	258.1	56.6	460.4	41.9	122.6	122.3	62.7	159.2	83.4
Sn ppm	63.9	11.1	99.4	4.5	17.5	0.0	53.6	1.0	6.4	<LOD	7.6
Co ppm	281.8	57.6	63.9	118.1	54.7	21.1	64.1	45.5	1.3	17.6	26.0
Cr ppm	77.2	75.6	152.2	75.0	117.2	97.8	101.2	264.3	68.0	340.9	327.9
Cd ppm	2.4	0.5	4.7	2.3	0.9	0.1	1.7	1.0	0.9	0.5	1.1
Mo ppm	10.8	2.5	2.7	6.9	5.2	3.2	4.5	2.3	3.6	4.0	6.2
V ppm	24.6	26.1	52.6	24.1	47.7	28.3	34.3	74.4	3.2	113.2	164.3
Li ppm	3.6	19.0	7.7	8.5	19.2	8.1	15.2	8.5	12.8	27.8	12.9
Sr ppm	50.2	24.6	32.6	46.1	35.8	49.5	27.2	6.5	122.5	207.4	233.8
Ba ppm	7.4	276.2	102.4	181.5	121.0	697.5	549.4	5.4	789.1	952.8	623.7
As ppm	8.7	4.0	6.1	2.8	7.5	0.8	4.8	2.1	1 674.2	0.9	18.4
Bi ppm	4.5	0.8	21.5	4.4	1.1	0.1	3.2	0.2	4.2	<LOD	0.3
Au ppb	26.94	6.85	205.17	105.66	4.69	4.03	5.10	3.91	10.38	18.39	<LOD
Pt ppb	<LOD	5.06	1.23	<LOD	0.61	0.63	0.75	1.01	0.08	<LOD	<LOD
Pd ppb	0.38	1.70	1.28	3.15	0.96	0.82	1.58	1.00	0.17	0.23	0.61
Magnetite %	16.7	46.4	9.9	21.1	40.7	44.6	28.3	18.3	<LOD	<LOD	<LOD

Table 3. Correlation matrix of the magnetite (69 samples) and magnetite-sulphide (37 samples) mineralization sample geochemistry

	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	S %	Ni ppm	Cu ppm	Zn ppm	Pb ppm	Sn ppm	As ppm	Au ppb	Pt ppb	Pd ppb	Co ppm	V ppm	Cr ppm	
SiO ₂ %	1.00																							
TiO ₂ %	0.13	1.00																						
Al ₂ O ₃ %	0.07	0.60	1.00																					
Fe ₂ O ₃ %	-0.45	-0.23	-0.61	1.00																				
MnO %	-0.40	-0.14	0.21	-0.46	1.00																			
MgO %	-0.07	-0.28	0.24	-0.35	0.26	1.00																		
CaO %	-0.30	-0.20	0.07	-0.52	0.80	0.38	1.00																	
Na ₂ O %	0.29	0.77	0.42	-0.21	-0.30	-0.45	-0.25	1.00																
K ₂ O %	-0.01	0.15	0.29	-0.14	-0.19	0.28	-0.13	0.14	1.00															
P ₂ O ₅ %	-0.22	0.30	0.53	-0.20	0.00	0.27	0.06	0.28	0.48	1.00														
S %	-0.46	-0.21	-0.11	0.06	0.24	-0.21	0.32	-0.15	-0.09	-0.06	1.00													
Ni ppm	0.01	0.29	0.34	-0.19	0.05	0.06	0.03	0.13	-0.08	-0.06	0.17	1.00												
Cu ppm	-0.30	-0.16	0.00	0.00	0.16	-0.19	0.19	-0.09	-0.12	-0.03	0.85	0.25	1.00											
Zn ppm	0.05	0.81	0.24	-0.06	-0.10	-0.55	-0.07	0.70	-0.08	0.10	-0.01	0.12	0.00	1.00										
Pb ppm	0.09	-0.10	-0.16	-0.05	-0.10	0.19	0.04	-0.04	0.27	-0.02	0.00	-0.16	-0.09	-0.09	1.00									
Sn ppm	-0.43	-0.15	-0.14	0.00	0.41	-0.18	0.50	-0.17	-0.24	-0.04	0.59	-0.06	0.49	0.19	-0.15	1.00								
As ppm	-0.28	-0.27	-0.09	-0.09	0.34	0.01	0.46	-0.24	-0.12	0.09	0.41	-0.07	0.29	-0.05	-0.06	0.48	1.00							
Au ppb	-0.14	-0.04	0.12	-0.10	0.14	-0.05	0.21	-0.05	-0.10	-0.04	0.44	0.15	0.63	0.06	-0.03	0.49	0.14	1.00						
Pt ppb	0.04	-0.05	0.04	-0.04	0.14	0.14	0.02	-0.18	-0.09	-0.02	-0.28	-0.05	-0.26	-0.04	-0.08	-0.01	0.13	-0.15	1.00					
Pd ppb	-0.08	-0.08	-0.09	0.12	-0.02	-0.10	0.02	-0.06	-0.10	-0.05	0.12	-0.06	0.16	0.02	-0.08	0.17	0.13	0.17	0.26	1.00				
Co ppm	-0.51	-0.16	-0.08	0.03	0.41	-0.19	0.37	-0.17	-0.21	-0.06	0.89	0.22	0.80	0.01	-0.12	0.56	0.39	0.34	-0.13	0.10	1.00			
V ppm	0.25	0.93	0.55	-0.26	-0.14	-0.23	-0.22	0.71	0.10	0.03	-0.27	0.36	-0.23	0.71	-0.09	-0.22	-0.34	-0.09	-0.01	-0.09	-0.21	1.00		
Cr ppm	0.18	0.17	0.55	-0.43	0.19	0.47	0.09	-0.03	-0.03	0.00	-0.25	0.60	-0.19	-0.16	-0.10	-0.26	-0.20	-0.08	0.18	-0.11	-0.15	0.30	1.00	

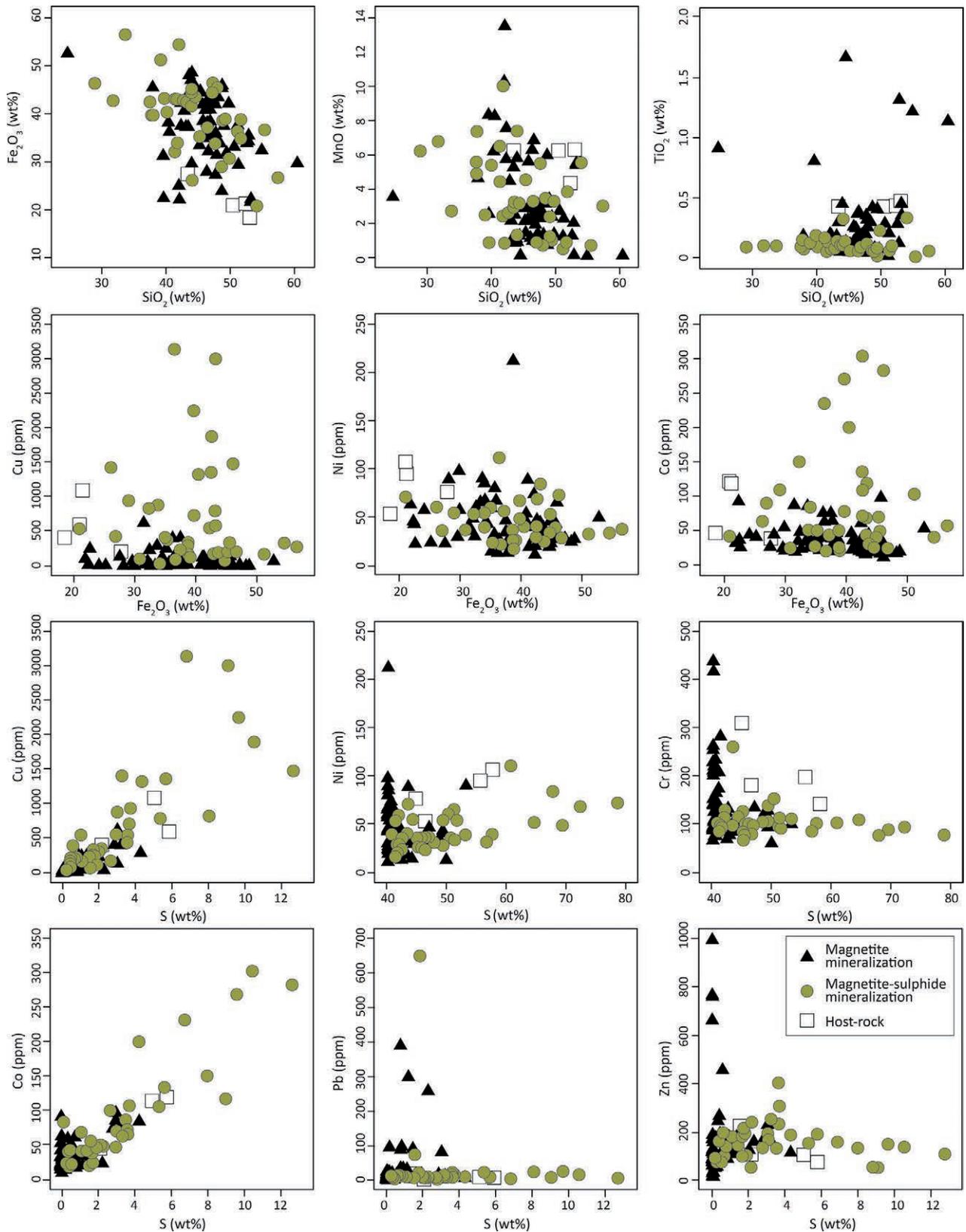


Fig. 10. Geochemical variation plots for selected major oxides and trace elements

Pb content in mineralized rocks is generally below 100 ppm, except for one magnetite-sulphide

mineralized sample (647 ppm) and three magnetite mineralized samples, except for a few samples ranging within

404–997 ppm. In samples with magnetite-sulphide mineralization, Zn content is low, ranging from 57 to 404 ppm. Neither Pb nor Zn are related to sulphides as there is no positive correlation with S content. However, Zn is in positive correlation with V, TiO_2 , and Na_2O .

Discussion

Magnetite percentage in 106 mineralized samples was determined by Satmagan analysis, which is based on the saturation magnetization obtained by measuring the total magnetic moment in a high magnetic field. Samples of magnetite mineralization line up, showing a good positive correlation between the total iron content and magnetite percentage, indicating that the iron is strictly related to the magnetite mineralization (Fig. 11). A majority of the magnetite-sulphide mineralization samples follow the same trend, but a group of samples with high sulphur content shows that not all of the total iron content is forming magnetite. Instead, iron can be involved in sulphides, which have to be taken into account when assessing the economic potential of the iron ore occurrence.

Different generations of iron oxides appearing as magnetite or hematite, magnetite to hematite alteration, sulphide precipitation or alteration as a pyrite/pyrrhotite association and minor chalcopyrite, galena, and sphalerite, as well as co-precipitation of sulphides and magnetite indicate a complex redox history [Hall, 1986; Lagoeiro, 2004; Slotznick et al., 2018] of iron-rich rocks in the Jõhvi area. The succession of general geological processes in time and their relations to specific ore-forming processes are not yet clear and definitely need more studies.

A remarkably high arsenic content (1674 ppm) was detected in one 20 cm long quarter core sample revealing an occurrence of arsenopyrite and loellingite (Fig. 9), which are considered as indicator minerals for Carlin-type gold deposits [Rytuba, 1984]. These minerals occur together with quartz and K-feldspar in a few cm-thick veins in biotite-quartz-feldspar gneisses suggesting that enrichment with arsenic could be related to secondary processes. Also, the generally low correlation seen between base metals e. g., Ni, Cu, Pb, Zn in mineralized rock can reflect possible remobilization of metals on a local scale during late or post-orogenic active processes.

Several of the analysed samples showed an elevated Au content (max 205 ppb), which is often linked with magnetite-sulphide mineralization having a positive correlation with S, Cu, and Sn, but does also occur in barren garnet gneisses. The average gold content is, however, low in mag-

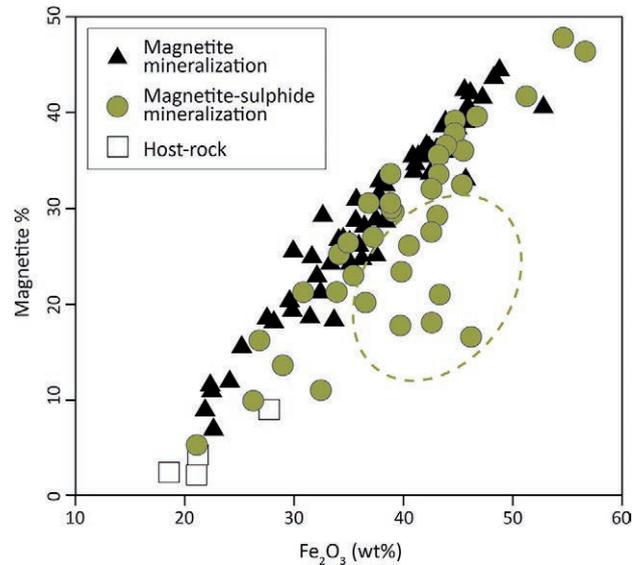


Fig. 11. Positive correlation between magnetite and total iron content in analysed samples. Contour-line showing samples of high iron-sulphide content

netite mineralization samples. Both arsenic and gold anomalies are indications of possible precious metal occurrence in addition to iron-sulphide mineralization and are yet to be more thoroughly studied.

The bulk rock analysis revealed high manganese contents (0.2–13.6 wt%) in a number of mineralized samples and on rare occasions in the surrounding gneisses. Manganese- and iron-rich rock types are also known in the Jägala rock complex of the Tallinn Zone [Petersell, 1976]. So far, there is no good explanation for manganese enrichment.

Previously, three distinctly different garnet solid solutions have been distinguished by electron microprobe analysis of the Jõhvi garnet-pyroxene-magnetite rock associations [Soesoo et al., 2021a]:

1. Spess_{48.1–50.5} Alm_{20.1–22.3} And_{18.6–21.7} Gross_{0.8–11.1} Prp_{2.1–4.6}
2. Alm_{60.3–72.4} Prp_{19.6–25.3} Spess_{3.6–7.6} Gross_{0.9–4.3} And_{1.2–3.1}
3. Alm_{34.3–34.8} Spess_{33.7–35.5} Prp_{13.0–13.9} Gross_{9.8–11.1} And_{5.8–7.4}

The content of MnO in previously studied Jõhvi high-spessartine garnets ranged from 1.6 to 21.15 wt%. This indicates that high-spessartine garnets form a fundamental part of magnetite bearing pyroxene-garnet gneisses and can be accountable for the high manganese concentrations in the rock. In addition to garnet, another Mn-carrying mineral, ilmenite, has been earlier found in several samples. The previous microprobe analyses show that ilmenite may contain 5 to 35 wt% of MnO in the studied Jõhvi rocks [Soesoo et al., 2021a], pointing to the presence of pyrophanite

(MnTiO_3), an end member of the ilmenite group. Also, relatively high manganese contents have been described in magnetite grains.

Current geological and geochemical concepts dealing with the mineralization of the Jõhvi Zone refer predominantly to possible similarities with the Bergslagen ore province in Sweden. Geographically, both regions belong to the same crustal structural domain, possibly having similar magmatic-volcanic-sedimentary features [Voolma et al., 2010; Bogdanova et al., 2015; Nirgi, Soesoo, 2019; Soesoo et al., 2021a]. In the Jõhvi area, the metamorphic temperatures (calculated by garnet-biotite geothermometry) were between 650 and 750 °C, and the garnet-biotite-plagioclase-quartz geobarometer yielded the pressure range of 2.9 to 4.9 kbar [Soesoo et al., 2021a].

Rocks in the Bergslagen region have been affected by polyphase ductile deformation and at least two regional phases of folding are proposed [Stålhös, 1981; Beunk, Kuipers, 2012]. The deformation history of the Precambrian basement of Estonia is not well described due to a lack of structural information (so far only two oriented boreholes were drilled in Estonia).

P-T estimates for rocks of the southern Bergslagen are within 500–650 °C and 2–6 kb [Sjöström, Bergman, 1998; Stephens et al., 2009], while for the northern part the estimates are somewhat higher [Andersson, 1997, 2005]. Geothermobarometry of arsenopyrite and sphalerite in the western part of Bergslagen suggests temperatures and pressures of 525 °C (between 440–590 °C) and ca 3–4 kb, while fluid inclusion entrapment conditions in the ore were determined to vary between 400 and 600 °C and pressure of 2.8 kb [Anderson et al., 2014]. There are no P-T estimates based on the Jõhvi zone ore minerals available. However, these general metamorphic conditions are principally similar for both regions.

One of the typical features of the Bergslagen ore province is a spatial association between Zn-Pb-Ag-(Cu-Au) sulphide deposits and magnetite-rich iron oxide deposits [Jansson, 2011]. The most common type of metal deposit in the Bergslagen ore province consists of associated skarn and metacarbonate iron oxides with varying amounts of manganese [Allen et al., 2003, 2008; Voolma et al., 2010]. Economically important deposit types of the Bergslagen mining district can be subdivided into the following end members with smooth transitions and include banded iron formation, magnetite calc-silicate skarn-, manganiferous skarn- and carbonate-hosted iron ore, apatite-bearing iron ore, stratiform and strata-bound Zn-Pb-Ag-(Cu-Au) sulfide ores, and tungsten skarn [Allen et al., 1996].

In the Bergslagen ore province, characteristics corresponding to more than one type sometimes are found in locally limited areas in one and the same deposit. Some iron oxide skarn deposits appear to have developed into quartz-rich iron deposits. Most of the skarns associated with iron oxide minerals, base metal sulphide minerals, and those dispersed through volcanic sequences are currently interpreted as a result of regional metamorphism of interbedded sedimentary, volcanic, and hydrothermally altered rocks, which are not spatially associated with specific events [Allen et al., 2003, 2008]. The poor correlation of major elements and metals, and between different metals in Jõhvi drill cores is probably due to several ore mineralization epochs and the complicated geological history of the volcanogenic-sedimentary basin during the Early Proterozoic.

In the same crustal structural domain, a metallogenic area of Orijärvi is known in Southern Finland. By the time of metamorphism and styles of metallic mineralization, this area is also considered to be an eastern extension of Bergslagen [Latvalahti, 1979; Kähkönen, 2005; Weihed et al., 2005; Bogdanova et al., 2015]. Albeit the Orijärvi area consists of four different types of metallic mineralization e. g., Zn-Cu±Pb, Au VMS (Aijala, Metsämönttu, Orijärvi), epithermal Au±Cu, banded iron formations (Jussarö, Nyhamn), and skarn iron ores (minor occurrences along the entire Orijärvi area), the magnetite-quartz-Fe silicate banded iron formations at Jussarö and Nyhamn resemble Jõhvi magnetite-rich gneisses in the high abundance of garnet and possibly the primary origin of iron-rich chemical sediments. Moreover, similarly to previous ideas of metallogenesis in the Jõhvi area [Tikhomirov, 1966], skarn iron ores have been described in the Orijärvi area as well. They are, however, not skarns *sensu stricto* (i. e., formed in contact with and due to an intrusion), but multiply deformed iron formation units that have suffered metamorphic skarnification and recrystallization in contact with chemically reactive lithological units, such as marbles, or are recrystallized carbonate-facies iron formations [Mäkelä, 1989]. These processes are not well understood in the Jõhvi Zone. So, the extensive comparative studies of the Jõhvi and other mineralisation occurrences in Northern Estonia will become relevant in the future after more mineralogical, geochemical and petrological information becomes available on the Estonian basement.

Conclusions

Magnetite and sulphide mineralization is historically known in the Jõhvi Zone, North-eastern

Estonia. The mineralized beds have a complicated internal structural outline and a large range of rock varieties. Magnetite and sulphide minerals can be found sporadically in all rock types. Yet, continuous mineralization, which is also a subject for mineral exploration, is related to certain rock types e. g., garnet-pyroxene, pyroxene-garnet, pyroxene gneisses or, to a lesser extent, garnet-amphibole, amphibole-garnet and biotite-amphibole gneisses.

Total iron content (Fe_2O_3) ranges from 21.0 to 56.6 wt%. In sulphide-rich mineralized rocks, a significant part of total iron content can be involved in sulphides, which have to be taken into account when assessing the economic potential of the iron ore occurrence.

The distribution of dip angle measurements of the two new drill cores shows that the schistosity of mineralized rock is subvertical; the main dip directions point to southern and northern sections, possibly indicating the N-S compression direction of folding.

Sulphide mineralization or alteration as a pyrite/pyrrhotite association and minor chalcopyrite, arsenopyrite and iron arsenide – loellingite, galena, and sphalerite indicate a complex, possibly multi-phase mineralization history of the iron-rich rocks. While the chalcopyrite appears together with pyrite and pyrrhotite, loellingite and arsenopyrite seem to be commonly related to quartz-feldspar veining.

The succession of general geological processes in time and their relations to specific ore-forming processes are not yet clear and need additional studies. Data from two new drill cores support the understanding that the Jõhvi Zone is geologically similar to Bergslagen in Sweden and possibly to Orijärvi in southern Finland.

This study was supported by ERDF and Estonian Research Council via project RESTA20 to TalTech “Genesis and economically valuable metals in polymetal sulphide mineralization in the Precambrian of Estonia”.

References

Actlabs. Geochemistry Schedule of Services and Fees. 2021. URL: <https://actlabs.com/wp-content/uploads/2021/07/Actlabs-Schedule-of-Services-Euro-2021.pdf> (accessed: 01.09.2021).

Allen R. L., Lundström I., Ripa M., Simeonov A., Christofferson H. Facies analysis of a 1.9 Ga, continental margin, back-arc, felsic caldera province with diverse Zn-Pb-Ag- (Cu-Au) sulfide and Fe-oxide deposits, Bergslagen region, Sweden. *Econ. Geol.* 1996. Vol. 91. P. 979–1008. doi: 10.2113/gsecongeo.91.6.979

Allen R., Stuart B., Ripa M., Jonsson R. Regional stratigraphy, basin evolution, and the setting

of stratabound Zn-Pb-Cu-Ag-Au deposits in Bergslagen, Sweden. Final report for SGU-FoU project 03-1203/99, 2003. P. 1–80.

Allen R., Ripa M., Jansson N. Palaeoproterozoic volcanic- and limestone-hosted Zn-Pb-Ag-(Cu-Au) massive sulphide deposits and Fe oxide deposits in Bergslagen, Sweden. *33 IGC excursion. Excursion guide.* 2008. No. 12. P. 14–20.

Andersson U. B. The late Svecofennian, high-grade contact and regional metamorphism in southwestern Bergslagen (central southern Sweden). Final report 970519, 03–819/93. 1997. 36 p. doi: 10.13140/2.1.5088.5920

Andersson U. B. Age and P-T paths of metamorphism in the Bergslagen region, southern Sweden. *Conf.: FoU-seminarium vid SGU.* Uppsala, 2005. P. 22–24.

Andersson S., Jonsson E., Högdahl K. Genesis of Pb-Ag-Cu-Fe-Zn-(Au-Sb-As) mineralisation at Hornkullen, Bergslagen, Sweden: insights from ore mineralogy, textural relations and geothermoarometry. *31st Nordic Geological Meeting.* Lund, 2014.

Beunk F. F., Kuipers G. The Bergslagen ore province, Sweden: Review and update of an accreted orocline, 1.9–1.8 Ga BP. *Precambrian Res.* 2012. Vol. 216–219. P. 95–119. doi: 10.1016/j.precamres.2012.05.007

Bogdanova S., Gorbachev R., Skridlaite G., Soesoo A., Taran L., Kurlovich D. Trans-Baltic Palaeoproterozoic correlations towards the reconstruction of supercontinent Columbia/Nuna. *Precambrian Res.* 2015. Vol. 259. P. 5–33. doi: 10.1016/j.precamres.2014.11.023

Dupuis C., Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. *Miner. Deposita.* 2011. Vol. 46, no. 4. P. 319–335. doi: 10.1007/s00126-011-0334-y

Erisalu E., Arvisto E. Report of the basement studies on Jõhvi magnetic anomaly and nearby. Geol. Survey of Estonia. EGF 3032 Tallinn, 1969. 257 p. (In Russian)

Hall A. J. Pyrite-pyrrhotite redox reactions in nature. *Mineral. Mag.* 1986. Vol. 50, no. 356. P. 223–229. doi: 10.1180/minmag.1986.050.356.05

Jansson N. F. The origin of iron ores in Bergslagen, Sweden, and their relationships with polymetallic sulphide ores: PhD thesis. Luleå University of Technology, Sweden, 2011. 73 p.

Kähkönen Y. Svecofennian supracrustal rocks. *Precambrian Geol. of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield.* Eds. Lehtinen M., Nurmi P. A., Rämö O. T., Amsterdam: Elsevier, 2005. P. 343–406.

Lagoeiro L. E. Transformation of magnetite to hematite and its influence on the dissolution of iron oxide minerals. *J. Metamorph. Petrol.* 2004. Vol. 16, no. 3. P. 415–423. doi: 10.1111/j.1525-1314.1998.00144.x

Latvalahti U. Cu-Zn-Pb ores in the Aijala-Orijärvi area, southwestern Finland. *Econ. Geol.* 1979. Vol. 74, no. 5. P. 1035–1059. doi: 10.2113/gsecongeo.74.5.1035

Linari A. A. Report on diamond drilling near Jõhvi. *Proceed. Tallinn Univ. Tech.* 1940. Vol. 15. P. 1–27. (In Estonian)

Mäkelä U. Geological and geochemical environments of Precambrian sulphide deposits in southwestern Finland. *Annales Academiae Scientiarum Fennicae.*

Series A. III. *Geologica-Geographica*. 1989. Vol. 151. P. 1–102.

Nirgi S., Soesoo A. Precambrian iron-sulphide mineralization of NE Estonia. 21st EGU General Assembly, EGU2019. Geophysical Research Abstracts, 21. Vienna, 2019.

North American Geologic-Map Data Model Science Language Technical Team. Report on progress to develop a North American science-language standard for digital geologic-map databases; Appendix B – Classification of metamorphic and other composite-genesis rocks, including hydrothermally altered, impact-metamorphic, mylonitic, and cataclastic rocks, Version 1.0 (12/18/2004). *Digital Mapping Techniques '04 – Workshop Proceed.* / Ed. Soller D. R., U. S. Geological Survey Open-File Report. 2004. P. 1–56.

Petersell V. Geological and metallogeny features of the crystalline basement of the southern slope of the Baltic Shield. Tallinn: ENSV TA GI, 1976. P. 1–28. (In Russian)

Plado J., Kiik K., Jokinen J., Soesoo A. Magnetic anomaly of the Jõhvi iron ore, northeastern Estonia, controlled by subvertical remanent magnetization. *Est. J. Earth Sci.* 2020. Vol. 69, no. 4. P. 189–199. doi: 10.3176/earth.2020.13

Puura V., Kuuspalu T. Ore occurrences in crystalline basement of Uljaste and Jõhvi area. 1:500 000. Map of metallogeny vol III. Geol. Survey of Estonia. Tallinn, 1966. EGF 2801. P. 1–267. (In Russian)

Puura V., Koppelmaa H. Exploration results of crystalline basement. Geol. Survey of Estonia. Tallinn, 1967. EGF 2982. (In Russian)

Puura V., Vaher R., Klein V., Koppelmaa H., Niin M., Vanamb V., Kirs J. Crystalline basement of Estonia. Moscow: Nauka, 1983. P. 1–208. (In Russian)

Puura V., Klein V., Kikas R., Konsa M., Kuldkepp R., Soesoo A. Svecofennian metamorphic zones in the basement of Estonia: an overview. *Proceed. Estonian Acad. Sci., Geol.* 2004. Vol. 53, no. 3. P. 149–164.

Robertson S. Classification of metamorphic rocks. *BGS Rock Classification Scheme*. British Geological Survey Research Report, RR 99–02. 1999. Vol. 2. P. 1–24.

Rytuba J. J. Arsenic minerals as indicators of conditions of gold deposition in Carlin-type gold deposits. *J. Geochem. Explor.* 1984. Vol. 25, no. 1–2. P. 237–238.

Slotznick S. P., Eiler J. M., Fischer W. W. The effects of metamorphism on iron mineralogy and the iron speciation redox proxy. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2018. Vol. 224. P. 96–115. doi: 10.1016/j.gca.2017.12.003

Sjöström H., Bergman S. Svecofennian metamorphic and tectonic evolution of east central Sweden: Research report of a project entitled: Svecofennisk meta-

morf och tektonisk utveckling i östra mellansverige. Uppsala: Uppsala University, 1998. P. 1–42.

Soesoo A., Puura V., Kirs J., Petersell V., Niin M., All T. Outlines of the Precambrian basement of Estonia. *Proceed. Estonian Acad. Sci., Geol.* 2004. Vol. 53. P. 149–164.

Soesoo A., Kosler J., Kuldkepp R. Age and geochemical constraints for partial melting of granulites in Estonia. *Mineral. Petrol.* 2006. Vol. 86. P. 277–300. doi: 10.1007/s00710-005-0110-8

Soesoo A., Nirgi S., Plado J. The evolution of the Estonian Precambrian basement: geological, geophysical and geochronological constraints. *Transactions of KarRC RAS.* 2020. Vol. 2. P. 18–33. doi: 10.17076/geo1185

Soesoo A., Nirgi S., Urtson K., Voolma M. Geochemistry, mineral chemistry and pressure – temperature conditions of the Jõhvi magnetite quartzites and magnetite-rich gneisses, NE Estonia. *Est. J. Earth Sci.* 2021a. Vol. 70, no. 2. P. 71–93. doi: 10.3176/earth.2021.05

Soesoo A. Main Precambrian and Paleozoic mineral resources of Estonia. *Aspects Min. Miner. Sci.* 2021b. Vol. 6, no. 3. P. 729–732. doi: 10.31031/AMMS.2021.06.000639

Stephens M. B., Ripa M., Lundström I., Persson L., Bergman T., Ahl M., Wahlgren C. H., Persson P. H., Wickström L. Synthesis of the bedrock geology in the Bergslagen region, Fennoscandian Shield, south-central Sweden. Uppsala: Geol. Survey of Sweden. 2009. P. 1–259.

Stålhös G. A tectonic model for the Svecofennian folding in east central Sweden. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar.* 1981. Vol. 103, no. 1. P. 33–46. doi: 10.1080/11035898109455202

Tikhomirov S. N. Geology of the crystalline basement in Leningrad oblast and Baltics II Leningrad: VSEGEI, 1966. P. 1–24. (In Russian)

Vaganova Z., Kadyrova M. Precambrian crystalline rocks and iron-rich quartzites based on the data of deep drill holes in Jõhvi. Geol. Survey of Estonia. Tallinn, 1948. EGF 125. (In Russian)

Voolma M., Soesoo A., Hade S. Geochemistry and P–T conditions of magnetite quartzites from Jõhvi Zone, NE Estonia. *Res. Terrae: Proceed. of the 5th Annual Meeting of Nordic Mineralogical Network V Annual Meeting.* Tallinn, 2010. Vol. 31. P. 34–38.

Weihed P., Arndt N., Billström C., Duchesne J. C., Eilu P., Martinsson O., Papunen H., Lahtinen R. Precambrian geodynamics and ore formation: the Fennoscandian Shield. *Ore Geol. Rev.* Vol. 27. P. 273–322. doi: 10.1016/J.OREGEOREV.2005.07.008

Received September 29, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Нирги, Сиим

старший геолог
Геологическая служба Эстонии
Раквере, Эстония, 44314

аспирант

Отделение геологии Института экологии и наук о Земле
Тартуский университет
Тарту, Эстония, 50411
эл. почта: siim.nirgi@egt.ee

Соэсоо, Алвар

профессор
Институт геологии
Таллиннский технический университет
Таллинн, Эстония, 19086

Отделение геологии Института экологии и наук о Земле
Тартуский университет
Тарту, Эстония, 50411
эл. почта: alvar.soesoo@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Nirgi, Siim

Geological Survey of Estonia
5 F. R. Kreutzwaldi, 44314 Rakvere, Estonia

Institute of Ecology and Earth Sciences, Department
of Geology, University of Tartu
14a Ravila, 50411 Tartu, Estonia
e-mail: siim.nirgi@egt.ee

Soesoo, Alvar

Institute of Geology Tallinn University of Technology
5 Ehitajate tee, 19086 Tallinn, Estonia

Institute of Ecology and Earth Sciences, Department
of Geology, University of Tartu
14a Ravila, 50411 Tartu, Estonia
e-mail: alvar.soesoo@gmail.com

УДК 553.2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ ВО ВСЕМ ПРОСТРАНСТВЕ

В. В. Щипцов¹, О. Б. Котова², Е. Г. Ожогина³, Б. И. Пирогов³

¹ Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

² Институт геологии им. академика Н. П. Юшкина,
ФИЦ «Коми научный центр УрО РАН», Сыктывкар, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья
им. Н. М. Федоровского (ФГБУ «ВИМС»), Москва, Россия

Представлен обзор научно-практических исследований в области технологической минералогии с обращением к истокам истории до современного состояния. Приводится и анализируется оригинальный библиографический список отечественных публикаций по различным направлениям технологической минералогии. Рассмотрена роль и значение технологической минералогии как самостоятельной дисциплины, определяющей технологическую оценку минерального сырья с целью получения конечного продукта. На отдельных примерах показано, что технологическая минералогия с каждым годом приобретает все большее значение в комплексе геологоразведочных работ с разработкой новых методов технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов, приведены морфолого-конституционные особенности малых частиц и их роль при технологической переработке минерального сырья, раскрыты возможности направленного изменения технологических свойств минерального сырья на наноуровне и получения новых материалов. Подчеркнута роль технологической минералогии в решении задач комплексного использования минерального сырья при добыче и переработке на примере отходов горно-обогатительной и металлургической промышленности Южного Урала, которые могут эффективно использоваться на горных предприятиях при создании искусственных массивов разного техногенного происхождения. Обращено внимание на развитие системы геолого-технологического моделирования при картировании месторождений полезных ископаемых различных генетических типов.

Ключевые слова: технологическая минералогия; металлы; промышленные минералы; метод; оценка; комплексное использование; направленные изменения; моделирование.

V. V. Shchiptsov, O. B. Kotova, E. G. Ozhogina, B. I. Pirogov. TECHNOLOGICAL MINERALOGY COMPREHENSIVELY

A review of basic and applied research in the field of technological mineralogy from its early history to the present time is given. An original bibliographic listing of Russian publications on various aspects of technological mineralogy is presented and analyzed. The role and significance of technological mineralogy as an independent discipline which underlies the technological assessment of mineral raw materials for obtaining the final product are considered. Specific examples are given to show that over years technological mineralogy is becoming increasingly important in the complex of geological exploration activities as new technological mineralogy methods are developed for the assessment

of metal ores and industrial minerals. The morphological and constitutive traits of small particles and their role in the technological processing of mineral raw materials are specified, the possibilities for targeted modification of the processing properties of mineral raw materials at the nanoscale and for the production of new materials are revealed. The role of technological mineralogy in enabling a comprehensive utilization of mineral raw materials in mining and processing is highlighted, using the example of wastes from the South Urals mining and smelting industry, which can be efficiently used at mining enterprises for creating artificial massifs of various technogenic origins. Attention is drawn to the development of a system of geological and technological modeling when mapping mineral deposits of various genetic types.

Key words: technological mineralogy; metals; industrial minerals; method; assessment; comprehensive use; targeted changes; modeling.

Введение

Время и пространство являются определяющими факторами геологической среды, генерирующей в себе разнообразные источники минерального сырья. С годами ощутимо меняется методология технологической минералогии, находясь в прямой зависимости от современных методов прогноза и оценки руд металлов и промышленных минералов, инновационных технологий и эколого-экономических факторов. Технологическая минералогия суммирует геологические и минералого-технологические исследования, связанные с изучением вещественного состава, текстурно-структурных признаков полезных ископаемых, технологических свойств минералов, направленные на разработку рациональных схем их обогащения, комплексное использование минерального сырья.

В данной статье представлен всесторонний обзор технологической минералогии от истоков до современного состояния. В основу обзора положена деятельность Комиссии по технологической минералогии РМО, которая на протяжении уже нескольких десятилетий осуществляет координирующую роль по данному направлению. Также много внимания вопросам технологической минералогии уделяется на ежегодных конференциях «Плаксинские чтения».

Технологическая минералогия вчера

Технологическая минералогия началась с учебника, составленного академиком Василием Михайловичем Севергиным (рис. 1) в 1798 г., под названием «Первые основания минералогии или естественной истории ископаемых тел» [Севергин, 1798]. В этом фундаментальном труде обобщены накопленные к тому моменту минералогические знания и со-

держатся сведения о минералах и полезных ископаемых Российской империи. На протяжении трех последующих десятилетий по нему учились студенты российских университетов. Формулируя задачи минералогии в целом, связанные с изучением строения и состава минералов, выяснением их взаимоотношений в месторождениях, установлением возможности практического использования, В. М. Севергин впервые ввел понятия «технологическая и экономическая» минералогия, что и определило дальнейшую традиционную практическую на-



Рис. 1. Академик В. М. Севергин (1765–1826)

Fig. 1. Academician V. M. Severgin (1765–1826)

правленность российской минералогии. Он не был одинок в своей деятельности по разработке и распространению прогрессивных приемов технологии производства и использования отечественного минерального и сельскохозяйственного сырья [Ушакова, Фигуровский, 1981]. Такого же рода работу вели его современники и коллеги, как по Императорской Академии наук – академики Т. Е. Ловиц, Я. Д. Захаров, И. Ф. Гмелин, К. Г. Кирхгофф, так и другие ученые России.

Ярким примером интуитивного использования технологической минералогии является выполнение заказа российского военного ведомства по производству артиллерийских запалов на основе высокообогащенного вольфрама в 1916 г., с которым успешно справились Г. О. Чечотт, обогатитель по профессии, совместно с обогатителем-технологом С. Е. Андреевым и механиком-конструктором Л. Б. Левенсоном. Именно этот комплексный подход к решению проблемы в цепочке «исследование – проектирование – оборудование», в которой технологической минералогии отводится главная роль [К 100-летию..., 2016], заложен ими в основу создания в 1916 г. компании «Механобр» (механическая обработка полезных ископаемых).

Период 1921–1955 гг. был существенным в плане разработки основ геолого-минералогической оценки руд месторождений полезных ископаемых. В первые годы после Великой Октябрьской социалистической революции в отечественной минералогии возникло новое научное направление – прикладная минералогия [Федоровский, 1935]. Создание ее тесно связано с именем блестящего организатора и крупного ученого-минералога Николая Михайловича Федоровского [Парамонов, Коробочкин, 1979]. Он создал минералогическую школу Института прикладной минералогии (его видные представители – В. В. Аршинов, Н. Е. Веденева, А. А. Глаголев, Е. В. Рожкова, Я. Д. Готман, Е. В. Копченова, Ф. В. Сыромятников и др.).

В этот период и в течение следующего этапа открываются институты, крупные лаборатории геологического и технологического профиля, зарождение которых сыграло большую роль в развитии минерально-сырьевой базы страны. Среди них – ВИМС (1935 г.); Научно-исследовательский геологоразведочный институт золотой промышленности (1935 г.); ЦНИИГеолнеруд (1945 г.); Казахский институт минерального сырья (1956 г.); ИМГРЭ (1956 г.); ЦНИГРИ (1957 г.); Красноярский НИИ геологии и минерального сырья (1957 г.); Дальневосточный ин-

ститут минерального сырья (1957 г.); с 1918 г. начал работу Гинцветмет, в 1929–1934 гг. созданы его филиалы в Ленинграде, Свердловске, Иркутске; с 1923 г. активизировалась деятельность «Механобра», с 1929 г. работает «Уралмеханобр»; с 1931 г. – Центральная научно-исследовательская лаборатория химической промышленности «Гиредмет», с 1943 г. – ГИГХС; в 1932 г. создан Государственный экспериментальный институт стекла; в 1951 г. – ВНИИХТ; в 1954 г. – ВНИИСИМС; в 1955 г. – «Механобрчермет»; в 1957 г. – ГИС и др.

Формирование основ прикладной минералогии было одобрительно встречено академиком В. И. Вернадским. Он писал, что истекшее десятилетие одновременно выдвинуло в минералогии цикл крупных и интереснейших задач, связанных с проблемами прикладной минералогии как минералогической основы учения о рудных ископаемых [Вернадский, 1954].

Началось широкое внедрение принципов прикладной минералогии в практику геологоразведочных работ и горнорудного производства (1956–1982 гг.) [Гинзбург, Александрова, 1974]. Особенно важно заметить, что они нашли конкретное решение в практике работы крупнейших ГОКов страны по добыче железных руд – на Южном, Ингулецком, Ново-Криворожском, Центральном и Северном – в Криворожском бассейне; Соколовско-Сарбайском – в Северном Казахстане; Ковдорском и Оленегорском – в Мурманской области; Качканарском – на Среднем Урале; и марганцевых руд – в Никопольском и Чиатурском бассейнах и др. Большая роль на этом этапе отводится ВИМСу.

Вовлечение в сферу практического интереса использования какого-либо минерала или отыскание новых областей применения минералов, уже используемых в народном хозяйстве, зачастую сравнимо по своему технико-экономическому эффекту с открытием и освоением нового месторождения. Как подчеркивал А. И. Гинзбург [1954], не существует минералов, не имеющих практического значения, мы просто не умеем еще все их использовать. В 1980-е годы трудами отечественных геологов и технологов была сформирована самостоятельная научная дисциплина «технологическая минералогия» и определены ее основные направления [Гинзбург и др., 1981; Пирогов, 1982; Ревнивцев, 1982].

Технологическая минералогия сегодня

В 1982 г. в Ленинграде под эгидой АН СССР, ВМО, Министерства цветной металлургии, ин-

ститута «Механобр» и ЛОП НТО цветной металлургии прошел VI съезд ВМО. Во вступительном слове президента ВМО акад. А. В. Сидоренко был рассмотрен широкий круг вопросов, в котором он особо обратил внимание на тот факт, что новые знания о минералах, тонких особенностях их конституции, текстурных и структурных особенностях руд могут послужить научной основой для совершенствования существующих и создания новых методов обогащения, гидрометаллургии и других технологических приемов и, как следствие, приведут в перспективе к созданию безотходной технологии.

С целью объединения усилий ученых и производственников по проблемам технологической минералогии съезд принял решение о создании комиссии по технологической минералогии. Возглавил комиссию директор «Механобра» В. И. Ревнивцев и руководил ею в период с 1983 по 1989 г. Под его руководством исследования по различным направлениям технологической минералогии приобрели четкий системный характер, объединив усилия исследователей прикладных НИИ многих министерств, АН СССР, геологов-разведчиков и работников ГОКов. Они обеспечили дальнейшее развитие технологической минералогии, разработку ее теоретических основ, внедрение конкретных достижений в производство [Проблемы..., 1985; Применение..., 1987; Технологическая..., 1987].

В этот период большое внимание уделяется разработке принципов геолого-технологической оценки руд с учетом закономерностей изменчивости технологических свойств минералов в единой геолого-технологической системе. Один из примеров – это монография коллектива авторов «Технологическая минералогия железных руд» [Пирогов и др., 1988], в которой рассмотрены проблемы технологической минералогии руд на современном ГОКе. К этому же периоду относится появление учебного пособия по принципам и методам геолого-технологического картирования месторождений полезных ископаемых [Пирогов и др., 1989]. С участием Б. И. Пирогова проведены минералого-технологические исследования железных и марганцевых руд крупнейших месторождений СССР, а также медно-молибденовых руд монгольского месторождения Эрдэнэт.

Необходимо отметить большой вклад проф. Г. А. Сидоренко (ВИМС). Ее работы по комплексированию методов минералогических исследований послужили фундаментальной основой для развития нового направления технологической минералогии [Сидоренко, 1996; Борискин, Сидоренко, 1997 и др.]. Помимо это-

го, по ее инициативе получило развитие и внедрение метрологическое обеспечение минералогических исследований как средства повышения качества, достоверности и точности результатов минералогических работ по диагностике и оценке типоморфных свойств минералов, фазового анализа и др.

В 1980-е создана лаборатория современных методов минералогического анализа веществ в Криворожском горнорудном институте и открыта межотраслевая геолого-технологическая лаборатория на Алмалыкском ГКМ. В январе 1990 г. в Ленинграде состоялось расширенное заседание комиссии с проведением научного семинара на тему «Безотходная технология и использование техногенных месторождений». Совместно с комиссией по рудной минералогии изданы труды советских ученых к XV съезду IMA в Пекине [Geologic-technological..., 1990]. На VIII съезде РМО (1992 г.) В. М. Изoitко выступила с пленарным докладом на тему «Проблемы и достижения технологической минералогии», в котором было освещено применение достижений и методов технологической минералогии для решения задач полноты и комплексности использования добываемого минерального сырья и утилизации отходов. В 1997 году выходит в свет книга «Технологическая минералогия и оценка руд» [Изоитко, 1997]. Эта работа является настольной книгой для геологов-технологов. В ней содержится информация по классификации процессов обогащения и типоморфным особенностям минералов и руд, методам их исследования, отмечены особенности геолого-технологической оценки руд важнейших промышленных типов месторождений. В. М. Изoitко разработала методики выделения природных и технологических типов по необходимому и достаточному количеству признаков, характеризующих руду.

С 1977 года ежегодно проводятся конференции «Плаксинские чтения». Уже более двух десятилетий в сборниках материалов конференции существует рубрика «Технологическая минералогия» [Развитие..., 2000; Направленное..., 2003; Современные..., 2004, 2005, 2007, 2012, 2017; Новые..., 2011; Инновационные..., 2013, 2020; Проблемы..., 2019 и др.]. В трудах юбилейной конференции «Плаксинские чтения – 2000», посвященной 100-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР И. Н. Плаксина, первый раздел именован «Технологическая минералогия» [Развитие..., 2000] и содержит две ключевые публикации [Кушпаренко, 2000; Чантурия, Башлыкова, 2000]. Можно привести и другие примеры работ в сборниках материалов «Плаксинских чтений» различных лет [Ко-

това и др., 2012; Горбатова и др., 2019; Лихникевич и др., 2019 и мн. др.]. В г. Петрозаводске в ИГ КарНЦ РАН проведены три конференции «Плаксинские чтения» [Проблемы..., 1998; Направленное..., 2003; Современные..., 2012], а также всесоюзное совещание «Комплексное освоение минеральных ресурсов Севера и Северо-Запада СССР (европейская часть)» [Комплексное..., 1990].

За последние 25 лет в области технологической минералогии состоялись защиты целого ряда докторских и кандидатских диссертаций, таких как: Остащенко Б. А. «Направленное изменение технологических свойств минералов» [1998]; Щипцов В. В. «Геолого-минералогические основы технологической оценки индустриальных минералов Карелии» [2000]; Котова О. Б. «Кристаллохимические и кристаллофизические процессы в приповерхностной области тонкодисперсных минеральных систем» [2000]; Лыгина Т. З. «Методические основы комплексной оценки состава и свойств неметаллических полезных ископаемых» [2001]; Ожогина Е. Г. «Технологическая минералогия труднообогатимых марганцевых руд России» [2002]; Левченко Е. Н. «Научно-методическое обоснование минералого-технологической оценки редкометалльно-титановых россыпей» [2011]; Якушина О. А. «Методика и технология изучения природного и техногенного минерального сырья методом рентгеновской томографии» [2012]; Горбатова Е. Н. «Минералого-технологическая оценка отходов обогащения колчеданных руд Южного Урала» [2013]; Лихникевич Е. Г. «Опережающие минералогические исследования руд редких металлов – основа для прогнозирования технологических свойств и выбора оптимальных технологических решений» [2021].

В Петрозаводске, в Институте геологии КарНЦ РАН с 2005 года размещается Комиссия по технологической минералогии РМО. Начиная с 2006 года указанная комиссия организует и проводит в разных городах страны российские семинары по технологической минералогии; такие мероприятия уже состоялись в Белгороде, Казани, Магнитогорске, Москве, Нижнем Новгороде, Петрозаводске, Санкт-Петербурге, Сыктывкаре, Чебоксарах. Издаются труды комиссии. Помимо этого, в программах таких научных форумов, как «Годичные собрания РМО», «Ферсмановские чтения» и «Плаксинские чтения», действуют секции по технологической минералогии, в журнале «Обогащение руд» существует рубрика «Технологическая минералогия». В 2019 г. на базе Белгородского государственного технологического универси-

тета им. В. Г. Шухова впервые на территории Российской Федерации проведен XIV Международный конгресс по прикладной минералогии (ICAM-2019) [Пирогов, Щипцов, 2016; Щипцов, Светова, 2020; Shchiptsov, 2021].

Развитие направлений технологической минералогии

С полным правом можно утверждать, что технологическая минералогия объединяет геолого-минералогические и технологические исследования [Ревнивцев, 1982; Пирогов и др., 1988; Изоитко, 1997; Юсупов, 1997; Остащенко, 1998; Щипцов, 2000; Юшкин, 2002; Пирогов, 2006, 2013; Роль..., 2018; Фундаментальные..., 2018].

В настоящее время технологическая минералогия занимает позицию самостоятельной дисциплины, служащей мостом между геологией рудопроявлений и месторождений и методами переработки минерального сырья с целью получения конечного продукта. Изучается взаимосвязь состава, структуры, физических свойств и генетических особенностей минерального вещества с его технологическими свойствами, что определяет технологическую оценку минерального сырья. Все эти данные влияют на особенности дезинтеграции и подготовки минерального сырья к обогащению, выбор оптимальных вариантов раскрытия минералов в процессах дробления и измельчения, роль направленного изменения физических свойств минеральных компонентов, т. е. образуется научная основа для управления качеством сырья, выбора материалов, реагентов. В этой цепочке последовательно обосновываются физические и химические процессы разделения, концентрации и переработки минералов природного и техногенного происхождения, что дает возможность принимать правильные решения по обезвоживанию, окускованию, брикетированию, транспортированию и складированию полезных ископаемых и продуктов их обогащения. Актуальным становится вопрос, как не дробить, не обогащать и не добывать ничего лишнего.

Современная технологическая минералогия закрепляет за собой право расширять использование новых технологических методов для оценки перспективных участков и площадей при геологическом изучении недр [Кушпаренко, 2000; Пирогов, 2006; Котова и др., 2012].

Одной из основных проблем недропользования в текущий момент является сокращение воспроизводства минерально-сырьевой базы, в том числе черных, цветных, легирующих металлов, многих видов нерудного сырья.

Одновременно в настоящее время резко возросла роль прикладных минералогических исследований, которые позволяют с достаточно высокой степенью достоверности проводить прогнозную технологическую оценку полезных ископаемых на разных стадиях изучения и освоения месторождений. Совершенно очевидно, что технологическая минералогия с каждым годом приобретает все большее значение в комплексе геологоразведочных работ, в первую очередь новых видов сырья. Ее методы и приемы позволяют с минимальными затратами проводить оценку технологических свойств сырья и способствуют созданию эффективных технологий их переработки, предусматривающих максимально возможное извлечение всех полезных ископаемых. Например, вопрос об использовании попутных компонентов углей Восточного Донбасса и отходов их переработки поднимался в течение многих лет [Большенко, 2006; Попова, 2012 и др.]. Исследования сотрудников ВИМСа [Ожогина, Рогожин, 2006] показали, что в отвалах Восточного Донбасса содержится 22,3 % Al_2O_3 , 55,45 % SiO_2 , 6,7 % Fe_2O_3 . Минералого-технологические данные характеризуют «спек» угля как достаточно однородный материал скрытокристаллического строения, в котором неравномерно распределены вкрапленники рудных фаз различной формы и размеров.

Наряду с кварцем, являющимся главной минеральной фазой, установлены индивидуализированные зерна муллита и кордиерита, в подчиненном количестве присутствует полевой шпат.

Изучение образцов угольного «спека» под электронным микроскопом показало, что рентгеноаморфная фаза большей частью сложена плотно упакованными округлыми выделениями размером от сотых долей до 1 мкм, полыми внутри, имеющими алюминий-кремнистый и кремнисто-алюминиевый составы (рис. 2). Содержание алюминия в них варьирует от 9,8 до 30,6 %, а кремния – от 11,9 до 46,9 % [Ожогина, Рогожин, 2006].

Полученные данные позволяют говорить о потенциальной возможности использования угольных отвалов в качестве алюминиевого сырья. Однако форма нахождения алюминия и размер выделений требуют разработки специальных технологий получения глиноземистых продуктов.

Перспективы и приоритеты развития технологической минералогии применительно к различным стадиям геологоразведочных работ, освоения и эксплуатации месторождений минерального сырья, а также возможностям химико-металлургических переделов, обогащения и модификации в соответствии с задачами инновационного совершенствования технологических процессов и создания дистанционных и геотехнологических методов [Борискин, Сидоренко, 1997; Цукерман, Николаев, 1999; Юшкин, 2002; Конеев, 2006; Юсупов, 2010; Новые..., 2011; Якушина, 2012; Инновационные..., 2013, 2020; Ожогина и др., 2019; Лихникевич, 2021 и др.]. В Петрозаводске в октябре 2008 года проводился семинар по новым методам технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов. В начале следующего года был издан сборник научных статей с аналогичным названием [Новые..., 2009].

К показательным примерам относится кварц. Это один из чистейших минералов на Земле. Все его модификации и разновидности составляют 12,6 вес. % земной коры. Микроэлементы являются важными при выявлении обстановки зарождения кварца, что определяет подходы по очистке кварца и направления использования в промышленности.

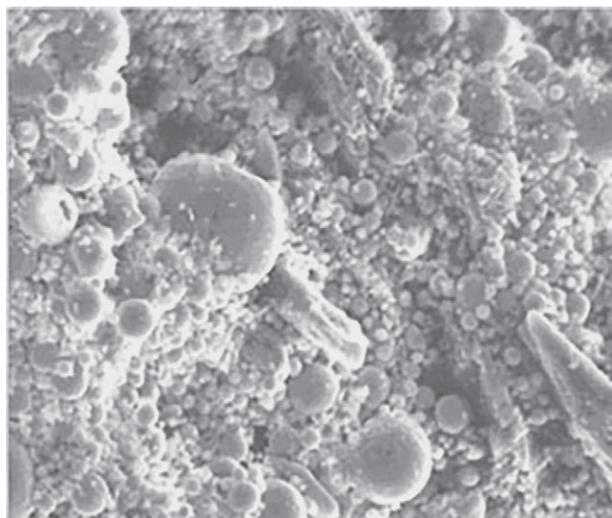


Рис. 2. Кремнисто-алюминиевые и алюминийкремнистые образования. Растровый электронный микроскоп [Ожогина, Рогожин, 2006]

Fig. 2. Siliceous-aluminum and aluminum-siliceous formations. Scanning electron microscope [Ozhogina, Rogozhin, 2006]

Наиболее низкие значения содержания микроэлементов в кварце отмечаются в температурном диапазоне 480–530 °С. На примере кварца Карело-Кольской провинции показано, что содержание рассеянных примесей Al, Ti, Ga, Fe, Ge и других элементов в них, по данным ПЭМ, различно. Наиболее загрязнены ими демпферные зоны, куда примеси сбрасываются кремнеземом в процессе формирования кристаллитов. Демпферные зоны, как правило, не содержат кристаллитов. По тем пустотам, которые образуются в кварце после обработки в HF, можно судить об их форме и размерах (рис. 3).

Области кристаллического кварца чередуются с областями дефектной, практически аморфной структуры, обогащенной микропримесями. Размеры каждой из областей могут варьировать от пяти до нескольких десятков нанометров и более. Форма, размеры кристаллитов в кварце отражают преимущества использованных приемов оценки исходного сырья и технологий очистки кварца [Раков и др., 2016, 2017].

Оценены как традиционные, так и другие виды кварцевого сырья с использованием новейших методик в области геолого-технологического изучения кварца. 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 сырья.

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.

Полученные результаты ложатся в основу аргументов в пользу расширения минерально-сырьевой базы кварцевого сырья [Щипцов и др., 2020].

Морфолого-конституционные особенности малых частиц и их роль при технологической переработке минерального сырья

К концу XX столетия технологическая минералогия вступила в новую фазу развития в связи расширением границ минерального мира за

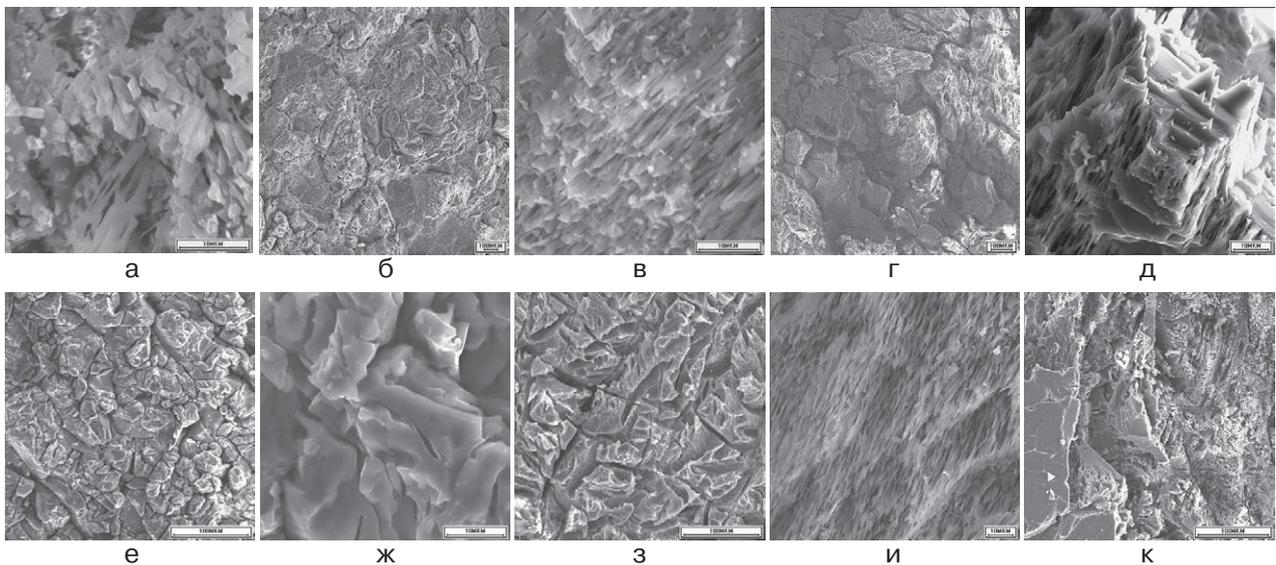


Рис. 3. Поверхность зерен кварца месторождений Кюрьяла (а, б), Фенькина Лампи (в, г), Меломайс (д, е), Перчатка (ж, з), Майское (и, к): протравленная, после обработки в HF – а, в, д, ж, и; кристаллиты в зернах кварца – б, г, е, з, к (РЭМ).

Исследования проведены с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH и микроанализатора INCA ENERGY 350 (аналитическая лаборатория ИГ КарНЦ РАН)

Fig. 3. Surface of quartz grains of the Kyuryala (a, б), Fenkina Lampi (в, г), Melomays (д, е), Perchatka (ж, з), Mayskoe (и, к) deposits: etched, after processing in HF – а, в, д, ж, и; crystallites in quartz grains – б, г, е, з, к (REM).

Studies were performed using a VEGA II LSH scanning electron microscope and INCA ENERGY 350 microanalyzer (analytical laboratory of IG KarRC RAS)

счет познания ультрадисперсного состояния вещества. Академик Н. П. Юшкин одним из первых подчеркнул значение интервенции минералогического познания во все области естествознания. В современной обстановке важную нишу заняли микро- и наноминералогия, что привело к значительному расширению представлений о дисперсных объектах. Как отметил Б. И. Пирогов [2010], к ним относятся не только фазовоиндивидуализированные малые и сверхмалые частицы с отчетливыми поверхностными ограничениями, но и внутрифазные структурированные элементы (многоядерные соединения, молекулярные и надмолекулярные группировки, кластеры и т. п.). Таким образом, современной тенденцией стало распространение исследований на все более и более глубокие уровни дисперсности, переход традиционных объектов околомикронной величины к ультрадисперсным объектам, т. е. изменение механических, электрических, термодинамических и других свойств в классической и квантовой областях. Микромир стал источником многих открытий в сфере минералогии и дальнейших направлений развития технологической минералогии, что сформулировано в работах Н. П. Юшкина, А. М. Асхабова, Б. И. Пирогова, В. И. Ревнивцева, В. Л. Таусона, В. А. Чантурии и других. Комиссия по технологической минералогии РМО уделяет большое внимание этому вопросу, о чем свидетельствуют сборники статей по технологической минералогии и другие публикации [Юшкин, Ракин, 1999; Котова, 2004; Новые..., 2009; Технологическая..., 2010; Результаты..., 2017; Фундаментальные..., 2018].

Хорошим объектным примером для этого подраздела служат шунгитоносные породы, получившие свое название от карельского села Шуньга, которые привлекают внимание на протяжении многих десятилетий. Шунгитоносные породы представляют собой природные углерод-минеральные композиты, содержащие шунгитовое вещество и широкий спектр микро- и наноминералов. Шунгитовое вещество – это уникальный природный углерод, некристаллический, неграфитируемый, фуллереноподобный. Уникальность шунгита проявляется на различных структурно-вещественных уровнях: а) надмолекулярном; б) молекулярном; в) электронно-энергетическом; г) структурно-физическом; д) геолого-генетическом (парагенетическом) [Калинин, Ковалевский, 2011]. Шунгиты не имеют аналогов в геологической истории нашей планеты по форме проявлений и суперкрупным запасам сырья в Заонежье, необычны по генезису, структуре входящего в их состав углерода, а также по структуре и текстуре самих

пород. Шунгитоносные породы Карелии имеют палеопротерозойский возраст. Основные их залежи отмечаются в составе вулканогенно-осадочных комплексов Онежской структуры заонежской свиты людиковийского надгоризонта с возрастным интервалом 2,1–1,92 млрд лет, выделено 9 горизонтов шунгитоносных пород с высоким содержанием $C_{орг} > 20\%$. Зажогинское рудное поле представлено несколькими десятками месторождений и проявлений высокоуглеродистых шунгитовых пород, в т. ч. разрабатываются два крупных месторождения (Максовское и Зажогинское).

В шунгитоносных породах роль некристаллической матрицы выполняет шунгитовое вещество в виде микрокристаллов с размерностью около 1 мкм, нанокристаллов (до 10 нм), а также слоев и кластеров как результат интеркаляции аморфного углерода. Такая структура активна в окислительно-восстановительных реакциях и обуславливает сорбционные и каталитические свойства материала. В составе высокоуглеродистых шунгитовых пород Зажогинского рудного поля преобладают шунгитовое вещество и кремнезем. Кремнезем представлен обычно частицами кварца или присутствует в составе различных силикатных образований. Вещественный состав также включает второстепенные минералы, такие как пирит, биотит, калиевый полевой шпат, альбит, фторapatит, хлорит, кальцит, среди акцессорных минералов отмечаются арсенопирит, рутил, циркон, титанит и др. Средняя плотность шунгитоносных пород обратно пропорциональна содержанию свободного углерода и колеблется в пределах 2,23–2,57 г/см³, водопоглощение – от 0,1 до 3,6 %, пористость – от 0,9 до 10,8 %. Высокоуглеродистые шунгитоносные породы характеризуются высокой биологической активностью, химической стойкостью, электропроводностью, свойствами адсорбции, радиоэкранизации и др. В табл. 1 приводятся основные параметры высокоуглеродистых пород [Калинин, Ковалевский, 2011; Kovalevski, Shchiptsov, 2019].

Области применения шунгитоносных пород определяются физико-механическими свойствами (плотность, пористость, удельная поверхность, механическая и оптическая характеристики, электропроводность, теплотворность, теплоемкость, термостойкость, взаимодействие с кислотами, щелочами, водой и другими жидкостями). Шунгитоносные породы с околомикронными углеродистыми частицами имеют широкий диапазон областей их использования с заданными свойствами, что находит применение в таких товарных продуктах, как

Таблица 1. Характеристика высокоуглеродистых шунгитоносных пород

Table 1. Description of high-carbon shungite-bearing rocks

Параметры Parameters	Зажогоно Zazhogino	Максово Maksovo	Подсосонье Podsosonie	Карнаволок Karnavolok	Лебещина Lebeshchina
структура structure	тонкокristаллическая thin-crystal				
текстура texture	массивная прожилковая massive veined	массивная брекчиевая прожилковая massive breccia veined	массивная брекчиевая massive breccia	прожилковая veined	массивная massive
содержание углерода, % carbon content, %	29,9–33,8	25,0–38,10	26,2–50,00	17,5–26,6	22,1–45,9
Na ₂ O	0,04–0,08	0,1–0,38	0,14–0,56	0,06–0,08	3,04–7,20
K ₂ O	1,31–2,35	1,28–2,47	1,29–2,50	1,72–1,97	0,1–4,08

сорбционный шунгитовый материал (очистка сточных вод, содержащих нефтепродукты и органические соединения, водоподготовка, очистка питьевой воды), шунгитовый наполнитель (изготовление открытопористых минералополлимерных материалов, резинотехническая промышленность, шинная промышленность), спецнаполнители (получение электропроводящих материалов, красок, паст, радиоэкранирующих покрытий и материалов), пигмент (крашение в массе синтетических волокон, лакокрасочная промышленность, окраска искусственных кож, полимерминеральные композиты) и прочее [Калинин и др., 2008].

В качестве другого примера рассматриваются существующие технологии обогащения титаномагнетитовых руд. Вовлечение титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд с высоким содержанием TiO₂ в промышленное освоение напрямую зависит от: особенностей морфологии рудных минералов, их гранулярного состава, наличия тонких выделений, структурной и фазовой неоднородности микроагрегатов титаномагнетита, т. е. степени перекристаллизации структур распада твердого раствора ряда магнетит-ильменит, гетерогенности химического состава магнетита, присутствия примесных элементов, относительной интенсивности амфиболизации, хлоритизации и мартитизации минералов руд. Кристаллохимические и морфоструктурные характеристики минералов титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд определяют их технологические свойства [Холоднов и др., 2012; Колкова, 2020 и др.].

Благодаря исследованиям, проведенным в ВИМСе на вкрапленных титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетитовых рудах Медведевского месторождения Кусинско-Копанского габбрового массива Южного Урала, прослеже-

на эволюция продуктов распада твердого раствора ряда магнетит-ильменитовых руд [Колкова, 2020]. Она выражена в изменении строения и состава микроагрегатов титаномагнетита в процессе их собирательной перекристаллизации. Окислительный обжиг микроагрегатов титаномагнетита позволяет уменьшить степень неоднородности их минерального и химического состава в силу перераспределения элементов в процессе диффузии и образования более устойчивых минеральных фаз – гематита, псевдобрукита и рутила. Установлено, что с уменьшением крупности материала интенсивность процесса твердофазного превращения увеличивается [Горбатова и др., 2020].

Направленное изменение технологических свойств минерального сырья на наноуровне и получение новых материалов

Идеи находят согласование с новой научной парадигмой минералогии – изучением и оценкой минерального вещества, кроме макроуровня, на микро- и наноуровне с учетом структурной организации дискретности, эволюции (онтогенез, сингенез и филогенез) во взаимодействии с живым веществом [Юшкин, 2002].

В настоящее время уделяется большое внимание направленному изменению технологических свойств минералов, горных пород и руд, что позволяет в некоторых случаях существенно модифицировать схемы извлечения полезных ископаемых за счет улучшения физико-химических характеристик сырья при различных нетрадиционных способах переработки [Проблемы..., 1985; Осташенко, 1998; Направленное..., 2003; Лыгина, 2007; Пирогов, 2010; Ожогина, Рогожин, 2010; Раков и др., 2016; Роль..., 2018; Инновационные..., 2020 и др.]. К таким способам можно отнести механоактивацию



Рис. 4. Перспективные технологии комплексной переработки неметаллических полезных ископаемых

Fig. 4. Promising technologies for complex processing of non-metallic minerals

и модификацию в энергонапряженном режиме, электрохимическую активацию, пульсационное, лазерное обогащение, криовоздействие и др. На рис. 4 показаны перспективные технологии комплексной переработки неметаллических полезных ископаемых, включая промышленные минералы. Эта схема разработана Т. З. Лыгиной. В ней сделан акцент на существенные изменения в структуре всех слагающих горную породу минеральных фаз, что приводит к расширению сфер использования минерального сырья [Лыгина, 2007].

Одним из эффективных методов создания дефектного состояния в диспергировании состояния в твердых телах является активационное измельчение [Юсупов и др., 1999; Юсупов, 2010]. В исследованиях по механоактивации используются центробежные мельницы периодического и непрерывного действия, вибрационные мельницы, атриторы и другие механизмы. Стадии механического активирования минералов указаны в табл. 2.

Роль технологической минералогии в решении задач комплексного использования минерального сырья при добыче и переработке

Фактически большинство месторождений твердых полезных ископаемых являются комплексными, содержащими несколько ми-

нералов и химических элементов (основные и попутные). В настоящее время происходит интенсивное развитие направлений технологической минералогии, связанных с задачами комплексных исследований минерального сырья на различных стадиях: а) оценка месторождения, б) добыча полезных ископаемых, в) использование отходов производства (вскрышные породы, отходы в хвостохранилищах). Комплексное использование месторождений в процессе их разработки имеет наибольшее распространение на горнодобывающих предприятиях черной и цветной металлургии. При этом, надо отметить, ценность сопутствующих полезных компонентов иногда превышает ценность основных.

Развитие минералого-технологических исследований стимулирует рациональное недропользование. Уровень современных технологических предложений позволяет эффективно перерабатывать руды с достаточно низким содержанием отдельных компонентов. Во всех случаях требуется максимально взвешенное и обоснованное технико-экономическими расчетами решение. Проектные разработки должны учитывать технологическую возможность и эффективность извлечения попутного полезного компонента с учетом экономики и экологии [Комплексное..., 1990; Дудкин, 1996; Сидоренко, 1996; Проблемы..., 1998; Цукерман, Николаев, 1999; Левченко, 2004; Современные...,

Таблица 2. Стадии механического активирования минералов [Юсупов, 2010]

Table 2. Stages of mechanical activation of minerals [Yusupov, 2010]

Стадии и величина удельной поверхности (S) Stages and specific surface area (S)	Характерные дефекты и структурные изменения. Степень аморфизации (X) Characteristic defects and structural changes. Degree of amorphization (X)	Процессы, в которых могут использоваться эффекты активации Processes in which activation effects can be used	Типы руд, к которым перспективно применение мех. активирования. Ориентировочный расход эл. энергии (N), кВт·ч/т Types of ores to which the use of mech. activation is promising. Approximate consumption of electric energy (N), kWh/t
I стадия S до 1–2 м ² /г Stage I S up to 1–2 m ² /g	Электронные и атомные дефекты. Дислокации всех видов. X до 3–5 Electronic and atomic defects. Dislocations of all types. X up to 3–5	Флотация. Магнитная сепарация. Другие методы, основанные на поверхностных свойствах Flotation. Magnetic separation. Other methods based on surface properties	Кварц-полевошпатовые, касситеритовые, фосфатные, сподуменовые, шеелитовые, магнетитовые руды. N до 10 Quartz-feldspar, cassiterite, phosphate, spodumene, scheelite, magnetite ores. N up to 10
II стадия S до 10–15 м ² /г Stage II S up to 10–15 m ² /g	Дефекты I стадии. Уменьшение размеров кристаллитов и наведение микроискажений. X до 25 % (реже более) Stage I defects. Reducing the size of crystallites and inducing micro-distortions. X up to 25 % (more – less common)	Химическое и термохимическое обогащение. Бактериальное и автоклавное выщелачивание. Другие гидрохимические процессы Chemical and thermochemical enrichment. Bacterial and autoclave leaching. Other hydrochemical processes	Бокситы и каолиновые руды шеелитовые, вольфрамитовые, хромитовые, титано-магнетитовые. Сульфиды и сульфаты. Фосфаты. Руды редкоземельных элементов. N > 1000 Bauxite and kaolinite ores are scheelite, wolframite, chromite, titanium-magnetite. Sulfides and sulfates. Phosphates. Ores of rare earth elements. N > 1000
III стадия S – переменная величина ввиду агрегации зерен Stage III S is a variable value due to grain aggregation	Дефекты I и II стадии. Распространение и нарастание микроискажений на основную часть объема. Превращение преобладающей части вещества в рентгеноаморфное состояние Defects of the I and II stages. The spread and increase of micro-distortions per the main part of the volume. Transformation of the predominant part of the substance into an X-ray amorphous state	Вскрытие и фазовые превращения минеральных веществ перед гидрометаллургическими процессами Opening and phase transformations of mineral substances before hydrometallurgical processes	Сподуменовые, лепидолитовые, пирохлоровые, касситеритовые концентраты руды. N > 1000 Spodumene, lepidolite, pyrochlore, cassiterite ore concentrates. N > 1000

2005, 2012; Дорошенко, Башлыкова, 2007; Лыгина, 2007; Калинин и др., 2008; Лыгина, Корнилов, 2010; Ожогина, Рогожин, 2010; Турсебеков и др., 2014; Технологические..., 2015; Роль..., 2018; Горбатова и др., 2020; Инновационные..., 2020] и другие.

В качестве примера можно указать, что сотрудники ВИМСа получили ценную информацию по редкометалльным рудам Чуктуконского, Томторского месторождений и Алгаминского рудопрооявления благодаря исследованиям в области технологической минералогии. Ими выявлены особенности состава и строения руд, разработаны технологии комплексной переработки вышеназванных объектов.

Отходы горнообогатительной и металлургической промышленности, накопленные на Южном Урале [Горбатова, Емельяненко, 2019], могут эффективно использоваться на горных предприятиях при создании искусствен-

ных массивов разного техногенного генезиса. На основе системного анализа проведено комплексное сравнение и осуществлен выбор оптимальных альтернатив, эффективно реализуемых в единой геолого-техногенной системе (ЕГТС) [Горбатова и др., 2020]. Данная система весьма актуальна при управлении горнопромышленными отходами. Единая геолого-техногенная многоуровневая система иерархической структуры показана на рис. 5. Она имеет четыре уровня иерархии: отрасль промышленности → производство → технологический процесс → агрегаты.

Другой пример охватывает Карельский регион и связан с Тикшеозерско-Елетьозерским магматическим комплексом. Он трактуется нами как два пространственно разобщенных массива, генетически связанные с одним мантийным источником. Возрастные данные приводятся на рис. 6 и 7. Комплекс входит в состав

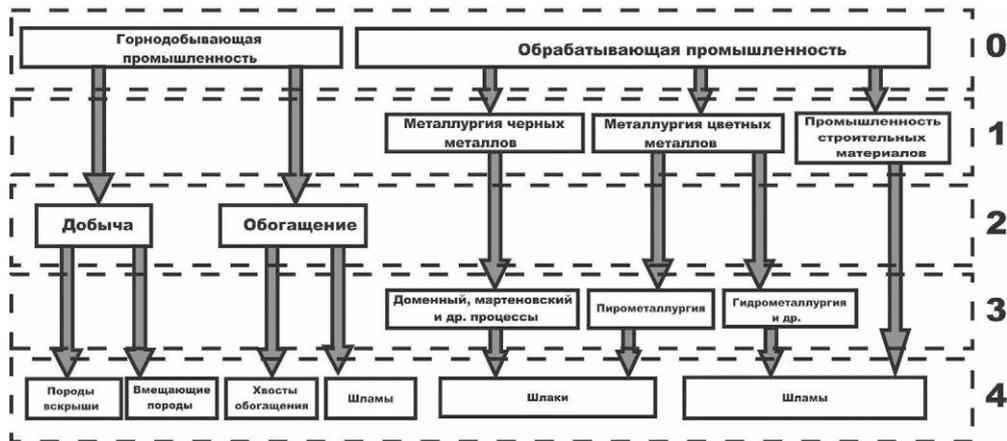


Рис. 5. Иерархическая структура единой геолого-технологической системы (ЕГТС):
 1 – Уровень отрасли промышленности; 2 – Уровень производства; 3 – Уровень технологического процесса; 4 – Уровень агрегатов

Fig. 5. Hierarchical structure of the Unified geological and technological system (EGTS):
 1 – Industry level; 2 – Production level; 3 – Technological process level; 4 – Level of aggregates

палеопротерозойской ятулийско-людиковийской крупной изверженной провинции в восточной части Фенноскандинавского щита. Этот комплекс является одним из древнейших подобных интрузивов с двухстадийным воздействием мантийного плюма [Shchiptsov, 2013; Sharkov et al., 2019 и другие]. Тикшеозерский массив образован преимущественно клинопироксенитами при существенной роли карбонатов и фойдолитов площадью 24 км², а Еletzозерский массив – сиенит-габбровыми породами на площади около 100 км².

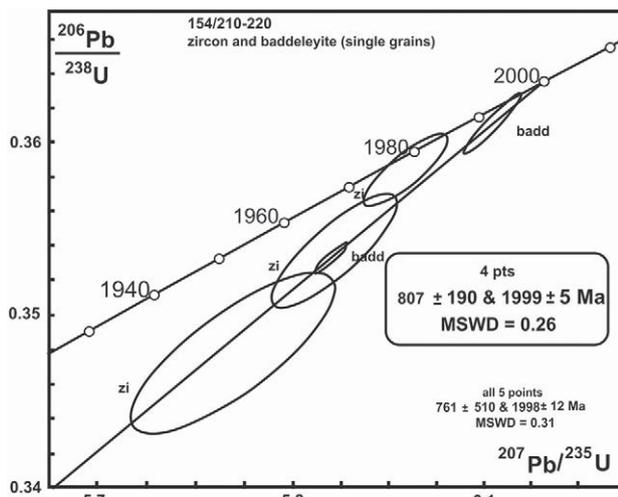


Рис. 6. Диаграмма конкордии с возрастными данными по U-Pb методу для карбонатита Тикшеозеро [Corfu et al., 2011]

Fig. 6. Concordia diagram with U-Pb data for the Tikshezero carbonatite [Corfu et al., 2011]

В отличие от большинства ультрамафит-щелочно-карбонатитовых комплексов, имеющих штокообразное или концентрически-зональное строение, Тикшеозерский интрузив представляет лополит, интродуцированный крупным карбонатитовым телом (рис. 8). В целом ситуация напоминает взаимоотношения между ферро-

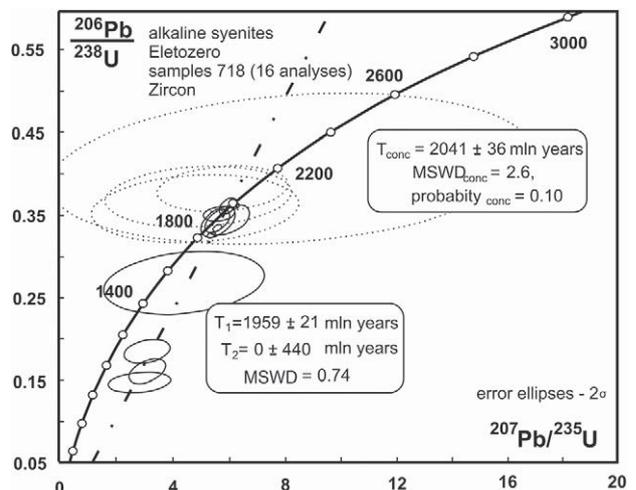


Рис. 7. Диаграмма конкордии циркона из сиенитов Ti-несущего Еletzозерского слоистого комплекса (16 анализов). Пунктирные эллипсы соответствуют измерениям изотопного состава циркона во время первого аналитического сеанса, сплошные эллипсы показывают результаты измерений второго сеанса [Sharkov et al., 2015]

Fig. 7. Concordia diagram for zircon from syenites of the Ti-bearing Eletozero layered complex (16 analyses). Dashed ellipses correspond to the measurements of zircon isotope composition during the first analytical session, solid ellipses show the measurement results of the second session [Sharkov et al., 2015]

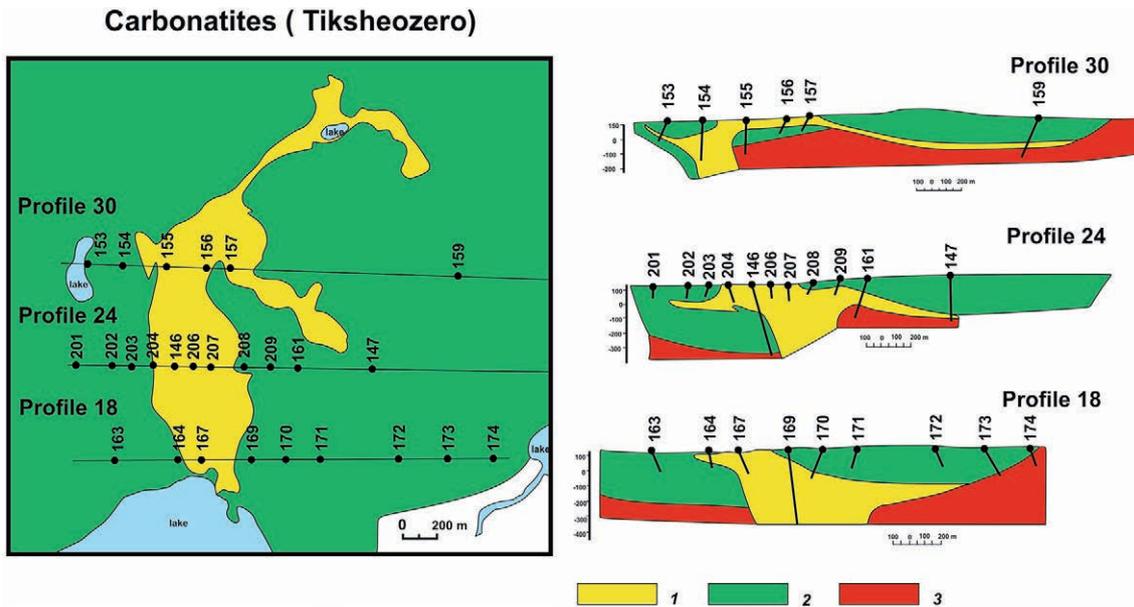


Рис. 8. Карбонатиты и ультрабазит-базиты (три профиля – 30, 24, 18):

1 – карбонатиты; 2 – ультрабазиты и базиты; 3 – гранодиориты. Отверстия для сверления и их номера по профилям отмечены черными кружками

Fig. 8. Carbonatites and ultrabasite-basites (three profiles – 30, 24, 18):

1 – carbonatites; 2 – ultrabasites and basites; 3 – granodiorites. Drilling holes and their numbers by profiles are marked with black circles

габброидами и сиенитами в сиенит-габбровых комплексах Елетьозерского массива.

Крупные месторождения второй фазы Тикшеозерско-Елетьозерского комплекса представлены промышленными минералами, имеющими практическое значение, такими как полевой шпат, нефелин, апатит, кальцит. Они представляют собой потенциальную базу для добычи и использования в различных областях народного хозяйства. В этом отношении их перспективы подкрепляются Постановлением о вхождении северных районов Республики Карелия в Арктическую зону.

Развитие системы геолого-технологического моделирования при картировании месторождений полезных ископаемых различных генетических типов

Геолого-технологическое (минералого-технологическое) картирование рассматривается как заключительный этап изучения месторождения. В основу такого картирования положен многолетний опыт по оценке руд разных генетических типов месторождений крупных ГОКов и обобщения материалов многих работ по данной проблеме. Помимо этого, в настоящее время используются современные подходы и методы компьютерного, в частности блочно-го, моделирования в практику геолого-техно-

логического картирования при эффективном планировании добычи. Опыт геолого-технологического моделирования в ходе опробования и картирования рудных месторождений изложен в ряде публикаций [Петров и др., 2010; Козлова, Рябцев, 2017; Мальцев, 2019; Мишулович, Петров, 2019 и др.]. В основе всех методов построения блочных моделей лежит привязка показателей изменчивости к фактическим данным опробования с использованием известных алгоритмов интерполяции для заполнения «межскважинного» пространства прогнозными значениями. Важное место занимает крикинг («kriging interpolation», или так называемый метод Wiener – Kolmogorov prediction). Способы подхода показаны в табл. 3 [Мальцев, 2019].

Построение блочной геолого-технологической модели месторождения полезных ископаемых относится к наиболее перспективному инструменту прогнозирования технологических и экономических показателей работы горнодобывающих предприятий. Важно отметить, что сегодня заложены методологические основы прогнозирования технологических и экономических показателей, которые определяются горнодобывающими предприятиями. Таким образом осуществляется трансформация геологической базы данных в геолого-технологическую, а на основе последней создается геолого-технологическая модель.

Таблица 3. Способы моделирования изменчивости технологических показателей

Table 3. Methods for modeling the variability of technological indicators

Способ подхода Approach method	Достоверность Reliability	Затратность Cost-effectiveness	Экспрессность Expressness
Прямой Straight	Высокая High	Высокая High	Низкая Low
Косвенный вещественный Indirect real	Средняя Average	Средняя Average	Средняя Average
Косвенный типизированный Indirect typed	Низкая Low	Низкая Low	Высокая High

Технологическая минералогия завтра

Задачи технологической минералогии в XXI веке определяются объективной необходимостью совершенствовать технологические процессы, разрабатывать и научно обосновывать новые технологические подходы и технические решения в связи с вовлечением в промышленную сферу совершенно новых металлов и химических элементов, минерального сырья техногенного происхождения. Значительно повышается и усиливается внимание к комплексному использованию минерального сырья.

Современные стратегии освоения отдельных месторождений должны предусматривать возможность предотвращения и компенсации негативных воздействий внешней среды, а также быстро реагировать на благоприятные экономические ситуации.

Основной принцип предусматривает освоение месторождений в том виде, в каком их создала природа. Георесурсы надо довести до состояния, наиболее приемлемого для извлечения с использованием современных технологий.

Новый принцип, способствующий инновациям, заложен в основу семантического понятия «доступность». Доступность минерально-сырьевых ресурсов – это свойство системы «общество – минеральные ресурсы», характеризующее возможность их эффективного и безопасного использования в зависимости от состояния ресурсов, потребности в них и достигнутого технологического уровня.

Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР 210 ИГ КарНЦ РАН 121040600173–1.

Литература

Большенко В. В. Эколого-экономическая оценка использования техногенных месторождений: на примере Восточного Донбасса: Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Ростов-на-Дону, 2006. 24 с.

Борискин В. П., Сидоренко Г. А. Достижения и направления развития технологической минералогии в ВИМСе // Мин. сырье (вопросы фундаментальной и прикладной минералогии). № 1. М.: ВИМС, 1997. С. 181–190.

Вернадский В. И. Избранные сочинения. М.: АН СССР, 1954. Кн. 1. 700 с.

Гинзбург А. И. О минералах – геохимических индикаторах и их значении при поисках руд редких металлов в пегматитах // ДАН СССР. 1954. Т. 98, № 2. С. 233–235.

Гинзбург А. И., Александрова И. Т. Технологическая минералогия – новое направление минералогических исследований // Разведка и охрана недр. 1974. № 3. С. 36–40.

Гинзбург А. И., Кузьмин В. И., Сидоренко Г. А. Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ. М.: Недр, 1981. 237 с.

Горбатова Е. Н. Минералого-технологическая оценка отходов обогащения колчеданных руд Южного Урала: Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. М., 2013. 44 с.

Горбатова Е. А., Емельяненко Е. А. Новый концептуальный подход к управлению горнопромышленными отходами // Вестник геонаук. 2019. № 6. С. 46–52.

Горбатова Е. А., Пирогов Б. И., Раков Л. Т., Колкова М. С. Особенности оценки магнитных свойств титаномагнетитов вкрапленных руд Медведевского месторождения // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения – 2019). Иркутск: Репроцентр А1, 2019. С. 64–67.

Горбатова Е. А., Емельяненко Е. А., Зарецкий М. В. Системный анализ в управлении горнопромышленными отходами с позиции минералогии // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2020). Сыктывкар: ИГ КомиНЦ УрО РАН, 2020. С. 268–269.

Дорошенко М. В., Башлыкова Т. В. Технологические свойства минералов: справочник для технологов. М.: Теплоэнергетик, 2007. 296 с.

Дудкин О. Б. Технологическая минералогия комплексного сырья на примере месторождений щелочных плутонов. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. 134 с.

Изоитко В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. 532 с.

Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксин-

ские чтения – 2013) / Отв. ред. В. А. Чантурия. Томск, 2013. 535 с.

Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2020) / Науч. ред. В. А. Чантурия, Д. В. Макаров, Т. Н. Матвеева. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 367 с.

К 100-летию «Механобра»: Андреев С. Н. Горный институт и Механобр (статья из «Юбилейного сборника. 1773–1923» Ленинградского горного института. Л., 1926 // Обогащение руд. 2016. № 3. С. 63–64.

Калинин Ю. К., Калинин А. И., Скоробогатов Г. А. Шунгиты Карелии – для новых стройматериалов, в химическом синтезе, газоочистке, водоподготовке и медицине. СПб.: УНЦХ СПбГУ, ВВМ, 2008. 219 с.

Калинин Ю. К., Ковалевский В. В. Шунгитовые породы – 50 лет научно-технологических исследований в Институте геологии // Геология Карелии от архея до наших дней. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 172–179.

Козлова М. А., Рябцев Д. А. Современный подход к геолого-технологическому картированию рудных месторождений // Горные науки и технологии. 2017. № 1. С. 23–30.

Колкова М. С. Минералого-технологические особенности железо-титановых руд Медведевского месторождения: Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2020. 25 с.

Комплексное освоение минеральных ресурсов севера и северо-запада СССР (европейская часть): Матер. всесоюз. совещ. 1–4 июня 1989 г. / Отв. ред. В. А. Чантурия. Петрозаводск, 1990. 232 с.

Конев Р. И. Наноминералогия золота. СПб.: Delta, 2006. 220 с.

Котова О. Б. Кристаллохимические и кристаллофизические процессы в приповерхностной области тонкодисперсных минеральных систем: Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. СПб.: РИЦ СПГПИ, 2000. 46 с.

Котова О. Б. Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 194 с.

Котова О. Б., Ожогина Е. Г., Рогожин А. А. Требования к минералогическим исследованиям при оценке качества полезных ископаемых // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения – 2012) / Ред. В. А. Чантурия, В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 21–24.

Кушпаренко Ю. С. Технологическая минералогия – основной метод технологической оценки потенциальных полезных ископаемых на ранних стадиях геологического изучения недр // Развитие идей И. Н. Плаксина в области обогащения полезных ископаемых и гидрометаллургии (Плаксинские чтения – 2000) / Отв. ред. В. А. Чантурия. М., 2000. С. 8–9.

Левченко Е. Н. Влияние вещественного состава на технологические свойства титан-циркониевых россыпей // Разведка и охрана недр. 2004. № 11. С. 42–47.

Левченко Е. Н. Научно-методическое обоснование минералого-технологической оценки редкоче-

мерно-титановых россыпей: Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. М., 2011. 49 с.

Лихникевич Е. Г., Ожогина Е. Г., Фатов А. С. Минералогическое обоснование необходимости применения гидро-пиро-металлургического передела при переработке редкометаллического сырья // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения – 2019). Иркутск: Репроцентр А1, 2019. С. 51–54.

Лихникевич Е. Г. Опережающие минералогические исследования руд редких металлов – основа для прогнозирования технологических свойств и выбора оптимальных технологических решений: Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. М., 2021. 49 с.

Лыгина Т. З. Методические основы комплексной оценки состава и свойств неметаллических полезных ископаемых: Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. М.: ВИМС, 2001. 50 с.

Лыгина Т. З. Комплексная переработка неметаллических полезных ископаемых как основа инновационных проектов // Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья / Под ред. В. В. Щипцова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 28–34.

Лыгина Т. З., Корнилов А. В. Минералого-технологическая оценка нерудного сырья: прогноз обогатимости и качества готовой продукции // Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы / Под ред. В. В. Щипцова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 31–36.

Мальцев Е. Н. Полезный опыт геолого-технологического моделирования в ходе технологического опробования и картирования рудных месторождений // Золотодобыча. Геология, горное дело, обогащение, металлургия, консалтинг. 2019. URL: <https://zolotodb.ru/article/12213/?page=all> (дата обращения: 01.08.2021).

Мишулович П. М., Петров С. В. Методологические аспекты создания геолого-технологических моделей месторождений полезных ископаемых // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2019. Т. 64, вып. 2. С. 249–265.

Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых (Плаксинские чтения – 2003) / Отв. ред. В. А. Чантурия. М.: Альтекс, 2003. 145 с.

Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов / Отв. ред. В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. 187 с.

Новые технологии обогащения и комплексной переработки труднообогатимого природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2011) / Отв. ред. В. А. Чантурия. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2011. 580 с.

Ожогина Е. Г. Технологическая минералогия труднообогатимых марганцевых руд России: Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. М., 2002. 49 с.

Ожогина Е. Г., Рогожин А. А. Технологическая минералогия в решении проблем комплексного освоения полезных ископаемых // Результаты фундамен-

тальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геологоразведочных работ. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 17–21.

Ожогина Е. Г., Рогожин А. А. Основные направления минералогических исследований руд при создании технологий их комплексной переработки // Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы / Под ред. В. В. Щипцова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 27–31.

Ожогина Е. Г., Пирогов Б. И., Горбатова Е. А. Минералого-технологическая оценка труднообогатимого рудного сырья (на примере железных руд и отходов обогащения) // Горный журнал. 2019. № 4. С. 59–64.

Осташенко Б. А. Направленное изменение технологических свойств минералов: Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 1998. 43 с.

Парамонов И. В., Коробочкин Н. П. Николай Михайлович Федоровский (1886–1956). М.: Наука, 1979. 166 с.

Петров С. В., Мишулович П. М., Смоленский В. В. Принципы создания блочной геолого-технологической модели месторождения // Обогащение руд. 2010. № 6. С. 34–38.

Пирогов Б. И. Роль минералогических исследований в обогащении руд // Минералогический журнал. 1982. № 1. С. 81–92.

Пирогов Б. И., Поротов Г. С., Холошин И. В., Тарасенко В. Н. Технологическая минералогия железных руд. Л.: Наука, 1988. 304 с.

Пирогов Б. И., Тарасенко В. Н., Холошин И. В. Принципы и методы геолого-технологического картирования месторождений полезных ископаемых: Учеб. пособие. Киев: УМК ВО Минвуза УССР, 1989. 64 с.

Пирогов Б. И. Методология технологической минералогии и природа технологических свойств минералов // Результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геологоразведочных работ. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 7–17.

Пирогов Б. И. Современные проблемы технологической минералогии // Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 7–23.

Пирогов Б. И. История становления и развития технологической минералогии // Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 7–37.

Пирогов Б. И., Щипцов В. В. История комиссии по технологической минералогии РМО (ВМО) с прологом // Зап. РМО. 2016. Ч. 1, вып. 7. С. 84–103.

Полова Э. М. Методы обоснования инновационных направлений развития угольных компаний: на примере Восточного Донбасса: Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Ростов-на-Дону, 2012. 24 с.

Применение технологической минералогии для повышения эффективности использования минерального сырья // Сб. науч. трудов. М.: МинГео СССР, ВИМС, 1987. 146 с.

Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения – 2019) / Науч. ред. В. А. Чантурия. Иркутск: Репроцентр А1, 2019. 467 с.

Проблемы комплексной переработки минерального сырья и охраны окружающей среды (Плаксинские чтения – 1998). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998.

Проблемы направленного изменения технологических и технических свойств минералов / Отв. ред. В. И. Ревнивцев. Л.: Механообр, 1985. 136 с.

Развитие идей И. Н. Плаксина в области обогащения полезных ископаемых и гидрометаллургии (Плаксинские чтения – 2000) / Отв. ред. В. А. Чантурия. М., 2000. 272 с.

Раков Л. Т., Дубинчук В. Т., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. 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 // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии / Под ред. В. В. Щипцова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 96–104.

Ревнивцев В. И. Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых // Зап. ВМО. 1982. Вып. 4. С. 4–20.

Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии / Отв. ред. В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. 164 с.

Роль технологической минералогии в рациональном недропользовании: Матер. рос. совещ. с междунар. участием. М.: ВИМС, 2018. 234 с.

Севергин В. М. Первые основания минералогии или естественной истории ископаемых тел. Кн. 1–2. СПб.: при Императорской Академии Наук, 1798. 800 с.

Сидоренко Г. А. Современный фазовый анализ как средство оценки качества и обоснования путей технологической переработки минерального сырья // Обогащение руд. 1996. № 1. С. 32–35.

Современные методы комплексной переработки руд и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2007) / Отв. ред. В. А. Чантурия. Апатиты: КНЦ РАН, 2007. Ч. 1. 228 с.

Современные методы оценки технологических свойств труднообогатимого и нетрадиционного минерального сырья благородных металлов и алмазов и прогрессивные технологии их переработки (Плаксинские чтения – 2004) / Отв. ред. В. А. Чантурия. М.: Альтекс, 2004. 232 с.

Современные методы комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения – 2012) / Под общ. ред. В. А. Чантурия и В. В. Щипцова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 397 с.

Современные проблемы комплексной переработки природного и техногенного минерально-

го сырья (Плаксинские чтения – 2005) / Отв. ред. В. А. Чантурия. СПб.: Роза Мира, 2005. 423 с.

Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017) / Отв. ред. В. А. Чантурия, А. П. Козлов, Т. В. Чекушина. Красноярск: СФУ, 2017. 452 с.

Технологическая минералогия главнейших промышленных типов месторождений / Отв. ред. В. И. Ревнивцев. Л.: Наука, 1987. 200 с.

Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы / Отв. ред. В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 192 с.

Технологические аспекты рационального недропользования: роль технологической оценки в развитии и управлении минерально-сырьевой базой страны / Ред. Т. В. Башлыкова, Ю. С. Карабасов. М.: МИСиС, 2005. 576 с.

Турсебеков А. Х., Шарипов Х. Т., Василевский Б. Б., Исоков У. М. Технологическая минералогия металлоносных горючих сланцев палеогена Узбекистана // Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. С. 93–103.

Ушакова Н. Н., Фигуровский Н. А. Василий Михайлович Севергин (1765–1826). М.: Наука, 1981. (Научные биографии). 160 с.

Федоровский Н. М. Наши достижения в области прикладной минералогии. М.-Л.: Гл. ред. геол.-развед. и геодез. лит., 1935. 160 с.

Фундаментальные и прикладные аспекты технологической минералогии / Под ред. В. В. Щипцова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 118 с.

Цукерман В. А., Николаев А. И. Инновационная политика комплексной переработки промышленных минералов Кольского полуострова // Месторождения промышленных минералов Фенноскандии: Матер. междунар. конф. Петрозаводск, 1999. С. 125–126.

Чантурия Е. Л., Башлыкова Т. В. Перспективы использования технологической минералогии для определения рациональной глубины дезинтеграции и обогащения труднообогатимых руд // Развитие идей И. Н. Плаксина в области обогащения полезных ископаемых и гидрометаллургии (Плаксинские чтения – 2000) / Отв. ред. В. А. Чантурия. М., 2000. С. 10–11.

Холоднов В. В., Бочарникова Т. Д., Шагалов Е. С. Состав, возраст и генезис магнетит-ильменитовых руд среднерифейского стратифицированного Медведевского массива (Кусинско-Копанский комплекс Южного Урала) // Литосфера. 2012. № 5. С. 145–165.

Щипцов В. В. Геолого-минералогические основы технологической оценки промышленных минералов Карелии: Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. СПб.: РИЦ СПГГИ, 2000. 46 с.

Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Светова Е. Н., Сканницкая Л. С. Кварцевое сырье Карело-Кольского региона: основные итоги исследований // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 10. С. 5–25. doi: 10.17076/geo1231

Щипцов В. В., Светова Е. Н. Комиссия по технологической минералогии Российского минералогического общества // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 6. С. 117–121.

Юсупов Т. С. Технологическая минералогия // Горные науки, освоение и сохранение недр земли. М.: Академия горных наук, 1997. С. 392–411.

Юсупов Т. С., Шумская Л. Г., Болдырев В. В. Механохимическое взаимодействие природных цеолитов с фосфатами кальция // ДАН. 1999. Т. 364, № 4. С. 508–511.

Юсупов Т. С. Новые технологические решения переработки и использования минерального сырья на основе изменения структуры и свойств минералов // Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы / Под ред. В. В. Щипцова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 23–27.

Юшкин Н. П. Современная минералогия и новые тенденции ее развития // Новые идеи и концепции в минералогии: Матер. III Междунар. семинара. Сыктывкар, 2002. С. 8–9.

Юшкин Н. П., Ракин В. И. Микро- и нанодисперсные структуры минерального вещества. Сыктывкар: Геопринт, 1999. 216 с.

Якушина О. А. Методика и технология изучения природного и техногенного минерального сырья методом рентгеновской томографии: Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. М., 2012. 45 с.

Corfu F., Bayanova T., Shchiptsov V., Frantz N. U-Pb ID-TIMS age of the Tikshozero carbonatite: expression of the 2.0 Ga alkaline magmatism in Karelia, Russia // Cent. Eur. J. Geosci. 2011. No. 3. P. 302–308.

Geologic-technological assessment of ore minerals, samples and deposits. Leningrad: Mekhanobr, 1990. 152 p.

Kovalevski V., Shchiptsov V. Shungites and their industrial potential // ICAM-2019 / S. Glagolev (ed.). Switzerland: SPEES, 2019. P. 202–204.

Sharkov E. V., Belyatsky B. V., Bogina M. M., Chistyakov A. V., Shchiptsov V. V., Antonov A. V., Lepikhina E. N. Genesis and 879 Age of zircon from alkali and mafic rocks of the Elet'ozero Complex, North Karelia // Petrology. 2015. No. 23. P. 259–280.

Sharkov E. V., Chistyakov A. V., Bogina M. M., Bogatikov O. A., Shchiptsov V. V., Belyatsky B. V., Frolov P. V. Ultramafic – alkaline – carbonatite complexes as a result of two-stage melting of a mantle plume: Evidence from the Mid-Paleoproterozoic Tikshezero Intrusion, Northern Karelia, Russia // Doklady Earth Sciences. 2019. P. 638–643.

Shchiptsov V. V. Industrial minerals of the Tikshezero-Eletozero alkaline ultramafic-carbonatitic and alkaline gabbroic complexes in Karelia, Russia // Mineral deposit research for a high-tech world, Proceed. 12th SGA Meeting, Uppsala, Sweden. 2013. No. 4. P. 1781–1789.

Shchiptsov V. V. Technological mineralogy: from Academician V. M. Severgin to the present day // Вестник геонаук. 2021. № 4. С. 20–24.

Поступила в редакцию 08.08.2021

References

- Bol'shenko V. V.* Ekologo-ekonomicheskaya otsenka ispol'zovaniya tekhnogennykh mestorozhdenii: na primere Vostochnogo Donbassa [Ecological and economic assessment of the use of technogenic deposits: On the example of the Eastern Donbass]: Summary of PhD (Cand. of Geol.-Miner.) thesis. Rostov-on-Don, 2006. 24 p.
- Boriskin V. P., Sidorenko G. A.* Dostizheniya i napravleniya razvitiya tekhnologicheskoi mineralogii v VIMSe [Achievements and directions of development of technological mineralogy in VIMS]. *Min. syr'e (voprosy fund. i priklad. mineralogii)* [Min. raw materials (questions of fund. and appl. mineralogy)]. No. 1. Moscow: VIMS, 1997. P. 181–190.
- Chanturia E. L., Bashlykova T. V.* Perspektivy ispol'zovaniya tekhnologicheskoi mineralogii dlya opredeleniya ratsional'noi glubiny dezintegratsii i obogashcheniya trudnoobogatimyykh rud [Prospects of using technological mineralogy to determine the rational depth of disintegration and enrichment of hard-to-enrich ores]. *Razvitie idei I. N. Plaksina v oblasti obogashcheniya poleznykh iskopaemykh i gidrometallurgii (Plaksinskie chteniya – 2000)* [Development of I. N. Plaksin's ideas in the field of mineral processing and hydrometallurgy (The Plaksin readings – 2000)]. Ed. V. A. Chanturia. Moscow, 2000. P. 10–11.
- Doroshenko M. V., Bashlykova T. V.* Tekhnologicheskie svoystva mineralov: spravochnik dlya technologov [Technological properties of minerals: a reference book for technologists]. Moscow: Teploenergetik, 2007. 296 p.
- Dudkin O. B.* Tekhnologicheskaya mineralogiya kompleksnogo syr'ya na primere mestorozhdenii shchelochnykh plutonov [Technological mineralogy of complex raw materials on the example of deposits of alkaline plutons]. Apatity: KSC RAS, 1996. 134 p.
- Fedorovskii N. M.* Nashi dostizheniya v oblasti prykladnoi mineralogii [Our achievements in the field of applied mineralogy]. Moscow-Leningrad, 1935. 160 p.
- Fundamental'nye i prikladnye aspekty tekhnologicheskoi mineralogii* [Fundamental and applied aspects of technological mineralogy]. Ed. V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2018. 118 p.
- Ginzburg A. I.* O mineralakh – geokhimicheskikh indikatorakh i ikh znachenii pri poiskakh rud redkikh metallov v pegmatitakh [On minerals – geochemical indicators and their significance in the search for rare metal ores in pegmatites]. *DAN SSSR [Dokl. Acad. Sci. USSR]*. 1954. Vol. 98, no. 2. P. 233–235.
- Ginzburg A. I., Alexandrova I. T.* Tekhnologicheskaya mineralogiya – novoe napravlenie mineralogicheskikh issledovaniy [Technological mineralogy – a new direction of mineralogical research]. *Razvedka i okhrana nedr [Exploration and Conservation of Mineral Resources]*. 1974. No. 3. P. 36–40.
- Ginzburg A. I., Kuzmin V. I., Sidorenko G. A.* Mineralogicheskie issledovaniya v praktike geologorazvedochnyykh rabot [Mineralogical research in the practice of geological exploration]. Moscow: Nedra, 1981. 237 p.
- Gorbatova E. N.* Mineralogo-tekhnologicheskaya otsenka otkhodov obogashcheniya kolchedannykh rud Yuzhnogo Urala [Mineralogical and technological assessment of the wastes from the enrichment of pyrite ores of the Southern Urals]: Summary of DSC (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. Moscow, 2013. 44 p.
- Gorbatova E. A., Emel'yanenko E. A.* Novyi kontseptual'nyi podkhod k upravleniyu gornopromyshlennymi otkhodami [A new conceptual approach to the management of mining waste]. *Vestnik geonauk [Bull. Geosciences]*. 2019. No. 6. P. 46–52.
- Gorbatova E. A., Pirogov B. I., Rakov L. T., Kolkova M. S.* Osobennosti otsenki magnitnykh svoystv titanomagnetitov vkraplennykh rud Medvedevskogo mestorozhdeniya [Features of the assessment of the magnetic properties of titanomagnetites disseminated ores of the Medvedevskoye deposit]. *Problemy i perspektivy effektivnoi pererabotki mineral'nogo syr'ya v 21 veke (Plaksinskie chteniya – 2019)* [Issues and prospects of effective processing of mineral raw materials in the 21st century (The Plaksin readings – 2019)]. Irkutsk: Reprintsentr A1, 2019. P. 64–67.
- Gorbatova E. A., Emel'yanenko E. A., Zaretskii M. V.* Sistemnyi analiz v upravlenii gornopromyshlennymi otkhodami s pozitsii mineralogii [System analysis in the management of mining and industrial waste from the standpoint of mineralogy]. *Sovr. probl. teor., eksperiment. i priklad. mineralogii (Yushkinskie chteniya – 2020)* [Modern probl. of theor., experimental and appl. mineralogy (The Yushkinsky readings – 2020)]. Syktyvkar: IG KomiNTs UrO RAN, 2020. P. 268–269.
- Innovatsionnye protsessy kompleksnoi i glubokoi pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2013)* [Innovative processes of complex and deep processing of mineral raw materials (The Plaksin readings – 2013)]. Ed. V. A. Chanturia. Tomsk, 2013. 535 p.
- Innovatsionnye protsessy kompleksnoi pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2020)* [Innovative processes of complex processing of natural and technogenic mineral raw materials (The Plaksin readings – 2020)]. Eds. V. A. Chanturia, D. V. Makarov, T. N. Matveeva. Apatity: KSC RAS, 2020. 367 p.
- Izoitko V. M.* Tekhnologicheskaya mineralogiya i otsenka rud [Technological mineralogy and ore evaluation]. St. Petersburg: Nauka, 1997. 532 p.
- K 100-letiyu "Mekhanobra": Andreev S. N.* Gornyi institut i Mekhanobr (stat'ya iz "Yubileinogo sbornika. 1773–1923" Leningradskogo gornogo instituta. L., 1926 [To the 100th anniversary of "Mechanobr": Andreev S. N. Mining Institute and Mechanobr (from the Anniversary proceed. 1773–1923. Leningrad Mining Institute. Leningrad, 1926)]. *Obogashchenie rud [Ore Enrichment]*. 2016. No. 3. P. 63–64.
- Kalinin Yu. K., Kalinin A. I., Skorobogatov G. A.* Shungity Karelii – dlya novyykh stroimaterialov, v khimicheskoy sinteze, gazoochistke, vodopodgotovke i meditsine [Shungite of Karelia – for new building materials, in chemical synthesis, gas treatment, water treatment and medicine]. St. Petersburg: UNTSKh SPbGU, VVM, 2008. 219 p.
- Kalinin Yu. K., Kovalevsky V. V.* Shungitovye porody – 50 let nauchno-tekhnologicheskikh issledovaniy v Institute geologii [Shungite rocks – 50 years of scientific and technological research at the Institute of Geology].

Geol. Karelii ot arkheya do nashikh dnei [Geol. of Karelia from the Archean to the present day]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2011. P. 172–179.

Kolkova M. S. Mineralogo-tehnologicheskie osobennosti zhelezo-titanovykh rud Medvedevskogo mestorozhdeniya [Mineralogical and technological features of iron-titanium ores of the Medvedevsky deposit]: Summary of PhD (Cand. of Geol.-Miner.) thesis. Novosibirsk: IGM SB RAS, 2020. 25 p.

Kompleksnoe osvoenie mineral'nykh resursov severa i severo-zapada SSSR (evropeiskaya chast'): Mater. vsesoyuz. soveshch. 1–4 iyunya 1989 g. [Complex development of mineral resources of the North and North-West of the USSR (European part): Materials of the All-Union. meeting. June 1–4, 1989]. Ed. V. A. Chanturia. Petrozavodsk, 1990. 232 p.

Koneev R. I. Nanomineralogiya zolota [Nanomineralogy of gold]. St. Petersburg: Delta, 2006. 220 p.

Kotova O. B. Kristallokhimicheskie i kristallofizicheskie protsessy v pripoverkhnostnoi oblasti tonkodispersnykh mineral'nykh system [Crystal-chemical and crystal-physical processes in the near-surface region of finely dispersed mineral systems]: Summary of DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. St. Petersburg: RIC SPGGI, 2000. 46 p.

Kotova O. B. Poverkhnostnye protsessy v tonkodispersnykh mineral'nykh systemakh [Surface processes in finely dispersed mineral systems]. Ekaterinburg: Ural Branch of RAS, 2004. 194 p.

Kotova O. B., Ozhogina E. G., Rogozhin A. A. Trebovaniya k mineralogicheskim issledovaniyam pry otsenke kachestva poleznykh iskopaemykh [Requirements for mineralogical research in assessing the quality of minerals]. *Sovr. metody tekhnol. mineralogii v protsessakh kompleksnoi i glubokoi pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2012)* [Current methods of technological mineralogy in the processes of complex and deep processing of mineral raw materials (The Plaksin readings – 2012)]. Eds. V. A. Chanturia, V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2012. P. 21–24.

Kozlova M. A., Ryabtsev D. A. Sovremennyi podkhod k geologo-tehnologicheskomu kartirovaniyu rudnykh mestorozhdenii [Modern approach to geological-and-metallurgical mapping of ore deposits]. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2017. No. 1. P. 23–30.

Kushparenko Yu. S. Tekhnologicheskaya mineralogiya – osnovnoi metod tekhnologicheskoi otsenki potentsialnykh poleznykh iskopaemykh na rannikh stadiyakh geologicheskogo izucheniya nedr [Technological mineralogy – the main method of technological assessment of potential deposits at the early stages of geological study of subsoil]. *Razvitie idei I. N. Plaksina v oblasti obogashcheniya poleznykh iskopaemykh i gidrometallurgii (Plaksinskie chteniya – 2000)* [Development of I. N. Plaksin's ideas in the field of mineral processing and hydrometallurgy (The Plaksin readings-2000)]. Ed. V. A. Chanturia. Moscow, 2000. P. 8–9.

Levchenko E. N. Vliyaniye veshchestvennogo sostava na tekhnologicheskie svoystva titan-tsirkonievnykh rossypei [Influence of the material composition on the technological properties of titanium-zirconium placers]. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and Conservation of Mineral Resources]. 2004. No. 11. P. 42–47.

Levchenko E. N. Nauchno-metodicheskoe obosnovanie mineralogo-tehnologicheskoi otsenki redkometall'no-titanovykh rossypei [Scientific and methodological substantiation of mineral and technological assessment of rare-metal-titanium placers]: Summary of DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. Moscow, 2011. 49 p.

Likhnikovich E. G., Ozhogina E. G., Fatov A. S. Mineralogicheskoe obosnovanie neobkhodimosti primeneniya gidro-pyro-metallurgicheskogo peredela pry pererabotke redkometall'nogo syr'ya [Mineralogical substantiation of the need to use hydro-pyro-metallurgical conversion in the processing of rare metal raw materials]. *Problemy i perspektivy effektivnoi pererabotki mineral'nogo syr'ya v 21 veke (Plaksinskie chteniya – 2019)* [Issues and prospects of effective processing of mineral raw materials in the 21st century (The Plaksin readings – 2019)]. Irkutsk: Reprocenter A1, 2019. P. 51–54.

Likhnikovich E. G. Operezhayushchie mineralogicheskie issledovaniya rud redkikh metallov – osnova dlya prognozirovaniya tekhnologicheskikh svoystv i vybora optimal'nykh tekhnologicheskikh reshenii [Advanced mineralogical studies of rare metal ores – the basis for predicting technological properties and choosing optimal technological solutions]: DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. Moscow, 2021. 49 p.

Lygina T. Z. Metodicheskie osnovy kompleksnoi otsenki sostava i svoystv nemetallicheskykh poleznykh iskopaemykh [Methodological foundations of a comprehensive assessment of the composition and properties of non-metallic minerals]: Summary of DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. Moscow: VIMS, 2001. 50 p.

Lygina T. Z. Kompleksnaya pererabotka nemetallicheskykh poleznykh iskopaemykh kak osnova innovatsionnykh proektov [Complex processing of non-metallic minerals as the basis of innovative projects]. *Znachenie issled. tekhnol. mineralogii v reshenii zadach kompleksnogo osvoeniya mineral'nogo syr'ya* [The significance of technol. mineralogy research in solving problems of a complex development of mineral raw materials]. Ed. V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. P. 28–34.

Lygina T. Z., Kornilov A. V. Mineralogo-tehnologicheskaya otsenka nerudnogo syr'ya: prognoz obogatimosti i kachestva gotovoi produktsii [Mineral and technological assessment of non-metallic raw materials: forecast of enrichment and quality of finished products]. *Tekhnol. mineralogiya, metody pererabotki mineral'nogo syr'ya i novye materialy* [Technol. mineralogy, methods of processing mineral raw materials and new materials]. Ed. V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. P. 31–36.

Maltsev E. N. Poleznyy opyt geologo-tehnologicheskogo modelirovaniya v khode tekhnologicheskogo oprobovaniya i katrirovaniya rudnykh mestorozhdenii [Useful experience of geological and technological modeling in the course of technological testing and mapping of ore deposits]. *Zolotodobycha. Geol., gornoe delo, obogashchenie, metallurgiya, konsalting* [Gold mining, mining, enrichment, metallurgy, consulting]. 2019. URL: <https://zolotodb.ru/article/12213/?page=all> (accessed: 01.08.2021).

Mishulovich P. M., Petrov S. V. Metodologicheskie aspekty sozdaniya geologo-tehnologicheskikh mode-

lei mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [Methodological aspects of creating geological and technological models of mineral deposits]. *Vestnik of St. Petersburg St. Univ. Earth Sci.* 2019. Vol. 64, iss. 2. P. 249–265.

Napravlennoe izmenenie fiziko-khimicheskikh svoystv mineralov v protsessakh obogashcheniya poleznykh iskopaemykh (Plaksinskie chteniya – 2003) [Directed change of physical and chemical properties of minerals in the processes of mineral enrichment (The Plaksin readings – 2003)]. Ed. V. A. Chanturia. Moscow: Altex, 2003. 145 p.

Novye metody tekhnologicheskoi mineralogii pri otsenke rud metallov i promyshlennykh mineralov [New methods of technological mineralogy in the evaluation of metal ores and industrial minerals]. Ed. V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2009. 187 p.

Novye tekhnologii obogashcheniya i kompleksnoi pererabotki trudnoobogatimogo prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2011) [New technologies of enrichment and complex processing of difficult-to-enrich natural and technogenic mineral raw materials (The Plaksin readings – 2011)]. Ed. V. A. Chanturia. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset, 2011. 580 p.

Ozhogina E. G. Tekhnologicheskaya mineralogiya trudnoobogatimyykh margantsevykh rud Rossii [Technological mineralogy of hard-to-enrich manganese ores of Russia]: Summary of DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. Moscow, 2002. 49 p.

Ozhogina E. G., Rogozhin A. A. Osnovnye napravleniya mineralogicheskikh issledovaniy rud pri sozdaniy tekhnologii ikh kompleksnoi pererabotki [The main directions of mineralogical studies of ores when creating technologies for their complex processing]. *Rezul'taty fund. i priklad. issled. po razrabotke metodik tekhnol. otsenki rud metallov i promyshlennykh mineralov na rannikh stadiyakh geologorazvedochnykh rabot* [Results of fund. and appl. research on the development of methods for technol. evaluation of metal ores and industrial minerals at the early stages of geological exploration]. Ed. V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk, 2010. P. 27–31.

Ozhogina E. G., Pirogov B. I., Gorbatova E. A. Mineralogo-tekhnologicheskaya otsenka trudnoobogatimogo rudnogo syr'ya (na primere zheleznykh rud i otkhodov obogashcheniya) [Mineralogical and technological assessment of hard-to-enrich ore raw materials (on the example of iron ores and processing waste)]. *Gornyi zhurn.* [Mining J.]. 2019. No. 4. P. 59–64.

Ostashchenko B. A. Napravlennoe izmenenie tekhnologicheskikh svoystv mineralov [Directed change of technological properties of minerals]: Summary of DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. Syktyvkar: IG Komi NTs UrO RAN, 1998. 43 p.

Paramonov I. V., Korobochkin N. P. Nikolai Mikhailovich Fedorovsky (1886–1956). Moscow: Nauka, 1979. 166 p.

Petrov S. V., Mishulovich P. M., Smolenskii V. V. Printsipy sozdaniya blochnoi geololo-tekhnologicheskoi modeli mestorozhdeniya [Principles of creating a block geological and technological model of the field]. *Obogashchenie rud* [Ore Enrichment]. No. 6. P. 34–38.

Pirogov B. I. Rol' mineralogicheskikh issledovaniy v obogashchenii rud [The role of mineralogical research

in ore enrichment]. *Mineralogicheskii zhurn.* [Mineralogical J.]. 1982. No. 1. P. 81–92.

Pirogov B. I., Porotov G. S., Kholoshin I. V., Tarasenko V. N. Tekhnologicheskaya mineralogiya zheleznykh rud [Technological mineralogy of iron ores]. Leningrad: Nauka, 1988. 304 p.

Pirogov B. I., Tarasenko V. N., Kholoshin I. V. Printsipy i metody geologo-tekhnologicheskogo kartirovaniya mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [Principles and methods of geological and technological mapping of mineral deposits]. Textbook. Kiev: UMK VO Minvuza USSR, 1989. 64 p.

Pirogov B. I. Metodologiya tekhnologicheskoi mineralogii i priroda tekhnologicheskikh svoystv mineralov [Methodology of technological mineralogy and the nature of technological properties of minerals]. *Rezul'taty fund. i priklad. issled. po razrabotke metodik tekhnol. otsenki rud metallov i promyshlennykh mineralov na rannikh stadiyakh geologorazvedochnykh rabot* [Results of fund. and appl. research on the development of methods for technol. evaluation of metal ores and industrial minerals at the early stages of geological exploration]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2006. P. 7–17.

Pirogov B. I. Sovremennyye problemy tekhnologicheskoi mineralogii [Modern problems of technological mineralogy]. *Tekhnol. mineralogiya, metody pererabotki mineral'nogo syr'ya i novye materialy* [Technol. mineralogy, methods of processing mineral raw materials and new materials]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. P. 7–23.

Pirogov B. I. Istoriya stanovleniya i razvitiya tekhnologicheskoi mineralogii [History of formation and development of technological mineralogy]. *Prognoznaya otsenka tekhnol. svoystv poleznykh iskopaemykh metodami priklad. mineralogii* [Predictive assessment of technological properties of minerals by methods of applied mineralogy]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. P. 7–37.

Pirogov B. I., Shchiptsov V. V. Istoriya komissii po tekhnologicheskoi mineralogii RMO (VMO) s prologom [History of the Commission on technological Mineralogy of the RMS (WMO) with a prologue]. *Zap. RMO* [Proceed. RMS]. 2016. Pt. 1, iss. 7. P. 84–103.

Popova E. M. Metody obosnovaniya innovatsionnykh napravleniy razvitiya ugol'nykh kompanii na primere Vostochnogo Donbassa [Methods of substantiation of innovative directions of development of coal companies: on the example of Eastern Donbass]: Summary of PhD (Cand. of Geol.-Miner.) thesis. Rostov-on-Don, 2012. 24 p.

Primenenie tekhnologicheskoi mineralogii dlya povysheniya effektivnosti ispolzovaniya mineral'nogo syr'ya [Application of technological mineralogy for increasing the efficiency of the use of mineral raw materials]: Proceed. Moscow: MinGeo USSR, VIMS, 1987. 146 p.

Problemy i perspektivy effektivnoi pererabotki mineral'nogo syr'ya v XXI veke (Plaksinskie chteniya – 2019) [Issues and prospects of effective processing of mineral raw materials in the 21st century (The Plaksin readings – 2019)]. Ed. V. A. Chanturia. Irkutsk: Reprocenter A1 LLC, 2019. 467 p.

Problemy kompleksnoi pererabotki mineral'nogo syr'ya i okhrany okruzhayushchei sredy (Plaksinskie chteniya – 1998) [Problems of complex processing

of mineral raw materials and environmental protection (The Plaksin readings – 1998)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1998.

Problemy napravlenogo izmeneniya tekhnologicheskikh i tekhnicheskikh svoystv mineralov [Problems of directed changes in technological and technical properties of minerals]. Ed. V. I. Revnitssev. Leningrad: Mehanobr, 1985. 136 p.

Razvitie idei I. N. Plaksina v oblasti obogashcheniya poleznykh iskopaemykh i gidrometallurgii (Plaksinskie chteniya – 2000) [Development of I. N. Plaksin's ideas in the field of mineral processing and hydrometallurgy (The Plaksin readings – 2000)]. Ed. V. A. Chanturiya. Moscow, 2000. 272 p.

Rakov L. T., Dubinchuk V. T., Shchiptsov V. V., Skamnitskaya L. S. Podvizhnye primesi v kvartse Karelo-Kol'skogo regiona [Mobile impurities in quartz of the Karelo-Kola region]. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of KarRC RAS]. 2016. No. 10. P. 100–118. doi: 10.17076/geo377

Rakov L. T., Skamnitskaya L. S., Dubinchuk V. T., Ruzhitsky V. V. Tekhnologicheskie svoystva kvartsa Karelo-Kol'skogo regiona [Technological properties of quartz of the Karelo-Kola region]. *Rezultaty mezhdistsiplinarnykh issled. v tekhnol. mineralogii* [Results of interdisciplinary research in technol. mineralogy]. Ed. V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2017. P. 96–104.

Revnitssev V. I. Rol' tekhnologicheskoi mineralogii v obogashchenii poleznykh iskopaemykh [The role of technological mineralogy in the enrichment of minerals]. *Zap. VMO* [Proceed. RMS]. 1982. Vol. 4. P. 4–20.

Rezultaty mezhdistsiplinarnykh issledovaniy v tekhnologicheskoi mineralogii [Results of interdisciplinary research in technological mineralogy]. Ed. V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2017. 164 p.

Rol' tekhnologicheskoi mineralogii v ratsional'nom nedropol'zovanii [The role of technological mineralogy in rational subsurface use]: Proceed. Russ. conf. with int. part. Moscow: VIMS, 2018. 234 p.

Severgin V. M. Pervye osnovaniya mineralogii ili estestvennoi istorii iskopaemykh tel [The first foundations of mineralogy or the natural history of fossil bodies]. B. 1–2. St. Petersburg, 1798. 800 p.

Shchiptsov V. V. Geologo-mineralogicheskie osnovy tekhnologicheskoi otsenki industrial'nykh mineralov Karelii [Geological and mineralogical bases of technological assessment of industrial minerals of Karelia]: Summary of DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. St. Petersburg: RIC SPGGI, 2000. 46 p.

Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Svetova E. N., Skamnitskaya L. S. Kvartsevoe syr'e Karelo-Kol'skogo regiona: osnovnye itogi issledovaniy [Quartz raw materials of the Karelo-Kola region: the main results of research]. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of KarRC RAS]. 2020. No. 10. P. 5–25. doi: 10.17076/geo1231

Shchiptsov V. V., Svetova E. N. Komissiya po tekhnologicheskoi mineralogii Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva [Commission on Technological Mineralogy of the Russian Mineralogical Society]. *Trudy KarNTs RAN* [Transactions of KarRC RAS]. 2020. No. 6. P. 117–121.

Sidorenko G. A. Sovremenniy fazoviy analiz kak sredstvo otsenki kachestva i obosnovaniya putei tekhnologi-

cheskoi pererabotki mineral'nogo syr'ya [Modern phase analysis as a means of assessing the quality and justification of ways of technological processing of mineral raw materials]. *Obogashchenie rud* [Ore Enrichment]. 1996. No. 1. P. 32–35.

Sovremennye metody kompleksnoi pererabotki rud i netraditsionnogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2007) [Modern methods of complex processing of ores and unconventional mineral raw materials (The Plaksin readings – 2007)]. Pt. 1. Ed. V. A. Chanturia. Apatity: KSC RAS, 2005. 228 p.

Sovremennye metody otsenki tekhnologicheskikh svoystv trudnoobogatimogo i netraditsionnogo mineral'nogo syr'ya blagorodnykh metallov ialmazov i progressivnyye tekhnologii ikh pererabotki (Plaksinskie chteniya – 2004) [Modern methods of assessing the technological properties of difficult-to-enrich and unconventional mineral raw materials of precious metals and diamonds and progressive technologies of their processing (The Plaksin readings – 2004)]. Ed. V. A. Chanturia. Moscow: Altex, 2004. 232 p.

Sovremennye metody tekhnologicheskoi mineralogii v protsessakh kompleksnoi i glubokoi pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2012) [Modern methods of technological mineralogy in the processes of complex and deep processing of mineral raw materials (The Plaksin readings – 2012)]. Eds. V. A. Chanturia, V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2012. 397 p.

Sovremennye problemy kompleksnoi pererabotki prirodnogo i tekhnogen'nogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2005) [Modern problems of complex processing of natural and technogenic mineral raw materials (The Plaksin readings – 2005)]. Ed. V. A. Chanturia. St. Petersburg, 2005. 423 p.

Sovremennye problemy kompleksnoi pererabotki trudnoobogatimyykh rud tekhnogen'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2017) [Modern problems of complex processing of hard-to-enrich ores and technogenic raw materials (The Plaksin readings – 2017)]. Eds. V. A. Chanturia, A. P. Kozlov, T. V. Chekushina. Krasnoyarsk: SFU, 2017. 452 p.

Tekhnologicheskie aspekty ratsional'nogo nedropol'zovaniya: rol' tekhnologicheskoi otsenki v razvitiy i upravlenii mineral'no-syr'evoi bazoi strany [Technological aspects of rational subsurface use: the role of technological assessment in the development and management of the country's mineral resource base]. Eds. T. V. Bashlykova, Yu. S. Karabasov. Moscow: MISiS, 2005. 576 p.

Tekhnologicheskaya mineralogiya glavneishikh promyshlennykh tipov mestozhdenii [Technological mineralogy of the main industrial types of deposits]. Ed. V. I. Revnitssev. Leningrad: Nauka, 1987. 200 p.

Tekhnologicheskaya mineralogiya, metody pererabotki mineral'nogo syr'ya i novye materialy [Technological mineralogy, methods of processing mineral raw materials and new materials]. Ed. V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. 192 p.

Tsukerman V. A., Nikolaev A. I. Innovatsionnaya politika kompleksnoi pererabotki industrial'nykh mineralov Kol'skogo Polyostrova [Innovative policy of complex processing of industrial minerals of the Kola Peninsula]. *Mestorozhdeniya industrial'nykh mineralov Fennoskan-*

dii: Mater. mezhdunar. konf. [Deposits of industrial minerals of Fennoscandia: Proceed. int. conf.]. Petrozavodsk, 1999. P. 125–126.

Turesebekov A. Kh., Sharipov Kh. T., Vasilevsky B. B., Isokov U. M. Tekhnologicheskaya mineralogiya metallonosnykh goryuchykh slantsev paleogena Uzbekistana [Technological mineralogy of metal-bearing goryuchy shales of the Paleogene of Uzbekistan]. *Tekhnol. mineralogiya v optimizatsii protsessov rudopodgotovki i obogashcheniya mineral'nogo syr'ya* [Technol. mineralogy in the optimization of ore preparation and mineral processing processes]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2014. P. 93–103.

Ushakova N. N., Figurovskii N. A. Vasily Mikhailovich Severgin (1765–1826). Moscow: Nauka, 1981. (Scientific biographies). 160 p.

Vernadsky V. I. Izbrannye sochineniya [Selected works]. Moscow: AN SSSR, 1954. Book. 1. 700 p.

Yusupov T. S. Tekhnologicheskaya mineralogiya [Technological mineralogy]. *Gornye nauki, osvoenie i sokhranenie nedr zemli* [Mining sciences, development and preservation of the Earth's interior]. Moscow, 1997. P. 392–411.

Yusupov T. S., Shumskaya L. G., Boldyrev V. V. Mekhanokhimicheskoe vzaimodeistvie prirodnykh tseolitov s fosfatami kal'tsiya [Mechanochemical interaction of natural zeolites with calcium phosphates]. *DAN [Dokl. Acad. Sci.]*. 1999. Vol. 364, no. 4. P. 508–511.

Yusupov T. S. Novye tekhnologicheskie resheniya pererabotki i ispolzovaniya mineral'nogo syr'ya na osnove izmeneniya struktury i svoystv mineralov [New technological solutions for processing and using mineral raw materials based on changes in the structure and properties of minerals]. *Tekhnol. mineralogiya, metody pererabotki mineral'nogo syr'ya i novye materialy* [Technol. mineralogy, methods of processing mineral raw materials and new materials]. Ed. V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. P. 23–27.

Yushkin N. P., Rakin V. I. Mikro- i nanodispersnye struktury mineral'nogo veshchestva [Micro- and nanodisperse structures of mineral matter]. Syktyvkar: Geoprint, 1999. 216 p.

Yushkin N. P. Sovremennaya mineralogiya i novye tendentsii ee razvitiya [New ideas and concepts in mineralogy]. Syktyvkar, 2002. P. 8–9.

Yakushina O. A. Metodika i tekhnologiya izucheniya pryrodnogo i tekhnogennogo syr'ya metodom rentgenovskoi tomografii [Methodology and technology of studying natural and man-made mineral raw materials by X-ray tomography]: Summary of DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. Moscow, 2012. 45 p.

Corfu F., Bayanova T., Shchiptsov V., Frantz N. U-Pb ID-TIMS age of the Tikshozero carbonatite: expression of the 2.0 Ga alkaline magmatism in Karelia, Russia. *Cent. Eur. J. Geosci.* 2011. No. 3. P. 302–308.

Geologic-technological assessment of ore minerals, samples and deposits. Leningrad: Mekhanobr, 1990. 152 p.

Kovalevskiy V., Shchiptsov V. Shungites and their industrial potential. *ICAM-2019*. S. Glagolev (ed.). Switzerland: SPEES, 2019. P. 202–204.

Sharkov E. V., Belyatsky B. V., Bogina M. M., Chistyakov A. V., Shchiptsov V. V., Antonov A. V., Lepikhina E. N. Genesis and 879 Age of zircon from alkali and mafic rocks of the Elet'ozero Complex, North Karelia. *Petrology*. 2015. No. 23. P. 259–280.

Sharkov E. V., Chistyakov A. V., Bogina M. M., Bogatikov O. A., Shchiptsov V. V., Belyatsky B. V., Frolov P. V. Ultramafic – alkaline – carbonatite complexes as a result of two-stage melting of a mantle plume: Evidence from the Mid-Paleoproterozoic Tikshezero Intrusion, Northern Karelia, Russia. *Dokl. Earth Sciences*. 2019. P. 638–643.

Shchiptsov V. V. Industrial minerals of the Tikshezero-Eletozero alkaline ultramafic-carbonatitic and alkaline gabbroic complexes in Karelia, Russia. *Mineral deposit research for a high-tech world*, Proceed. 12th SGA Meeting, Uppsala, Sweden. 2013. No. 4. P. 1781–1789.

Shchiptsov V. V. Technological mineralogy: from Academician V. M. Severgin to the present day. *Vestnik geonauk [Bull. Geosciences]*. 2021. No. 4. P. 20–24.

Received August 08, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Щипцов Владимир Владимирович

заведующий отделом минерального сырья, д. г.-м. н., старший научный сотрудник
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

Котова Ольга Борисовна

главный научный сотрудник, д. г.-м. н., старший научный сотрудник
Институт геологии им. академика Н. П. Юшкина, Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр УрО РАН»
ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 167962
эл. почта: kotova@geo.komisc.ru
тел.: (8212) 245160

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

Kotova, Olga

Institute of Geology, Komi Science Centre, Ural Branch,
Russian Academy of Sciences
54 Pervomaiskaya St., 167982 Syktyvkar, Komi, Russia
e-mail: kotova@geo.komisc.ru
tel.: (8212) 245160

Ожогина Елена Германовна

заведующая отделом минералогии, д. г.-м. н., проф.
Всероссийский научно-исследовательский институт
минерального сырья им. Н. М. Федоровского
Старомонетный пер., 31, Москва, Россия, 117017
эл. почта: vims-ozhogina@mail.ru
тел.: +79161653479

Пирогов Борис Иванович

главный научный сотрудник, д. г.-м. н., проф.
Всероссийский научно-исследовательский институт
минерального сырья им. Н. М. Федоровского
Старомонетный пер., 31, Москва, Россия, 117017
эл. почта: pirogov_bi@inbox.ru
тел.: (495) 9515043

Ozhogina, Elena

All-Russian Scientific-research Institute of Mineral Resources
named after N. M. Fedorovsky (VIMS)
31 Staromonetny Per., 117017 Moscow, Russia
e-mail: vims-ozhogina@mail.ru
tel.: +79161653479

Pirogov, Boris

All-Russian Scientific-research Institute of Mineral Resources
named after N. M. Fedorovsky (VIMS)
31 Staromonetny Per., 117017 Moscow, Russia
e-mail: pirogov_bi@inbox.ru
tel.: (495) 9515043

УДК 553.311

МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ПОЛУЧЕНИЮ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА НА СТОЙЛЕНСКОМ ГОКЕ

**Т. А. Чикишева^{1,2,3}, К. К. Емельянова¹, С. А. Прокопьев^{1,2},
Е. С. Прокопьев^{1,2}, Н. Ю. Турецкая¹, И. А. Калинин¹, С. А. Напольских⁴**

¹ ООО НПК «Спирит», Иркутск, Россия

² Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

³ Иркутский государственный университет, Россия

⁴ АО «Стойленский ГОК», Старый Оскол, Россия

Представлены результаты минералогических исследований продуктов обогащения Стойленского ГОКа после проведения технологических испытаний по получению высококачественного железорудного концентрата методом винтовой сепарации. Приведены краткие данные о геологическом строении месторождения, типах железистых кварцитов и вещественном составе рудных зон. При изучении продуктов обогащения методами оптической микроскопии установлены их минеральный состав, типы сростков рудных минералов и характер распределения магнетита и гематита по классам крупности. В результате испытаний получен кондиционный высококачественный магнетит-гематитовый концентрат с массовой долей железа общего 69,96 %.

К л ю ч е в ы е с л о в а: минералого-технологическая оценка железных руд; железистые кварциты; высококачественный железорудный концентрат; магнетит-гематитовый концентрат; винтовая сепарация.

T. A. Chikisheva, K. K. Emelyanova, S. A. Prokopiev, E. S. Prokopiev, N. Yu. Turetskaya, I. A. Kalinkin, S. A. Napolskikh. MINERALOGICAL SUPPORT TO THE PROCESS OF OBTAINING HIGH-GRADE IRON ORE CONCENTRATE AT STOILENSKY PROCESSING PLANT

The article reports the results of mineralogical studies of the Stoilensky processing plant products taken during in-process tests of the spiral separation method for obtaining high-grade iron ore concentrate. The geological structure of the deposit, types of ferruginous quartzite, and the material composition of ore strata are briefly described. The study of the concentration products by optical microscopy revealed their mineral composition, types of ore mineral intergrowth, and the size distribution patterns of magnetite and hematite. As a result of the tests, high-quality specification-grade magnetite-hematite concentrate with a total iron mass fraction of 69.96 % was obtained.

Key words: mineralogical and technological evaluation of iron ores; ferruginous quartzites; high-grade iron ore concentrate; magnetite-hematite concentrate; spiral separation.

Введение

Вовлечение в переработку железорудного сырья с совместным присутствием в нем магнетита и гематита на сегодняшний день является актуальной задачей для железнодобывающей промышленности, решение которой позволит повысить комплексность и безотходность переработки железных руд. Технологически это представляет собой проблему, так как основная масса рудных минералов может сосредотачиваться в тонких классах, иметь сложные тонкие прорастания, и кроме того, наряду с магнетитом и гематитом железо содержится в силикатных и карбонатных минералах, которые разубоживают товарную продукцию. Поскольку методы химического анализа не дают полного представления о вещественном составе железорудного сырья, для его детальной и объективной оценки необходимо использовать методы технологической минералогии, которые позволяют получить точное представление о формах нахождения железа, характеристиках минералов – концентратов железа и типах их сростаний. Кроме того, минералого-технологические исследования позволят спрогнозировать распределение минеральных фаз по продуктам обогащения, а оперативная оценка поможет скорректировать режимы рудоподготовки и обогащения, что подтверждается многочисленными исследованиями ведущих специалистов в области технологической минералогии [Целюк и др., 2013; Пирогов, Ожогина, 2020]. Таким образом, главная цель настоящей работы – показать важность применения минералогических методов исследования на всех этапах технологических работ.

Для усовершенствования технологического процесса ООО НПК «Спирит» (г. Иркутск) проведены испытания по применению винтовой сепарации (ВС) в технологической схеме предприятия Стойленского ГОКа. Основные задачи испытаний: выявление возможности увеличения производительности обогатительной фабрики (ОФ), повышение комплексности переработки руды и общего содержания железа в концентрате ОФ за счет попутного извлечения гематита. Извлечение гематита наряду с магнетитом – это дополнительная продукция, полученная из уже подготовленного сырья, причем в себестоимости данной части товарной продукции не будет затрат на добычные работы, дробление и измельчение руды. Наряду с вышеуказанным, требования к качеству железорудных концентратов растут: на мировом рынке пользуются спросом концентраты с массовой долей железа 69–70 %, поскольку высокое ка-

чество концентратов позволяет значительно сократить затраты при металлургическом переделе [Прокопьев, 2019; Прокопьев и др., 2021].

Материалы и методы

Технологические работы выполнялись на железорудном сырье Стойленского месторождения. Исходным материалом для проведения испытаний являлись продукты обогащения Стойленского ГОКа, а именно пробы сливов мельницы и спиральных классификаторов I стадии классификации. Изучение вещественного состава проб проводилось методами химического и минералогического анализов на материале двух технологических проб железистых кварцитов, измельченных до крупности менее 10 мм в пробе слива мельницы и менее 2 мм в сливе спирального классификатора. Определение содержания общего железа было выполнено методом спектрофотометрии при помощи комплекса GENESYS 10 S Thermo Fisher Scientific (ИЗК СО РАН). Минералогические исследования выполнены в минералогическом отделе ООО НПК «Спирит» в соответствии с нормативно-методическими документами Научного совета по минералогическим методам исследований (НСОММИ): № 162 «Оптико-минералогический анализ шлиховых и дробленых проб», № 194 «Минераграфическое изучение руд» и № 181 «Виды и последовательность минералогических исследований при сопровождении технологических работ. Железные руды» [Виды..., 2014; Минераграфическое..., 2018].

Краткая геологическая характеристика месторождения

Стойленское месторождение железных руд располагается в юго-восточной части Лебединского рудного поля Курской магнитной аномалии в 7 км к юго-западу от станции Старый Оскол. Полоса магнитных аномалий Стойленского месторождения выявлена геофизическими работами в 1919–1926 гг. Запасы утверждены ГКЗ СССР в 1958 г. в количестве 136,8 млн т по категориям В+С₁ и 16,2 млн т по категории С₂. Отработка богатых руд начата в 1969 г. карьерным способом и продолжается по настоящее время. Разработку месторождения ведет АО «Стойленский ГОК», основная продукция комбината: железорудный концентрат, железная агломерационная руда и железорудные окатыши. Сырье Стойленского месторождения представляет собой богатые руды коры выветривания и неокисленные железистые кварциты, которые обогащаются методом мокрой магнитной сепарации (ММС).

В геологическом строении месторождения участвуют сильно дислоцированные породы докембрия и трансгрессивно перекрывающие их осадочные породы палеозойской, мезозойской и кайнозойской эратем (мощность варьируется от 50 до 200 м), представленные в верхней части разреза суглинками, песками, глинами, песчаниками, а ниже – мергелями, мелом, песчано-глинистыми и глинисто-известковыми отложениями. На породах докембрия повсеместно развита площадная кора выветривания мощностью от 5 до 80 м, представленная богатыми железными рудами (остаточными), переходящими с глубиной в окисленные и полукисленные железистые кварциты. В северной части месторождения закартированы интрузии диоритов и габбро-диоритов, в юго-восточной – интрузии плагиогранитов. Широкое развитие имеют межпластовые и секущие дайки, а также жилы ультраосновных пород, диорит-порфиритов и гранитов мощностью от 50 см до 10–20 м. Породы докембрия смяты в сложные многопорядковые складки, вплоть до плейчатости. Неокисленные железистые кварциты в зависимости от минерального состава подразделяются на 4 типа:

магнетитовые, силикатно-магнетитовые, железнослюдково-магнетитовые и слабрудные (в виде пропластков мощностью не более 10 м). В магнетитовых кварцитах основными породообразующими минералами являются кварц и магнетит. Силикатно-магнетитовые кварциты содержат, кроме того, силикатные минералы – куммингтонит, актинолит, тремолит, рибекит, биотит, иногда эгирин и тальк. В железнослюдково-магнетитовых кварцитах присутствуют собственно железная слюдка (гематит) в количестве 5–10, реже 18–20 % и карбонаты – доломит, анкерит, кальцит [Железорудная..., 2007].

Результаты и обсуждение

Макроскопическое исследование материала пробы слива мельницы, классифицированного по крупности и подвергнутого магнитному фракционированию, показало, что магнитная фракция в нем представлена обломками пород серого цвета преимущественно кварцевого состава с рассеянными включениями рудных и породообразующих минералов – магнетита, гематита и сульфидов (рис. 1, Г), пироксенов

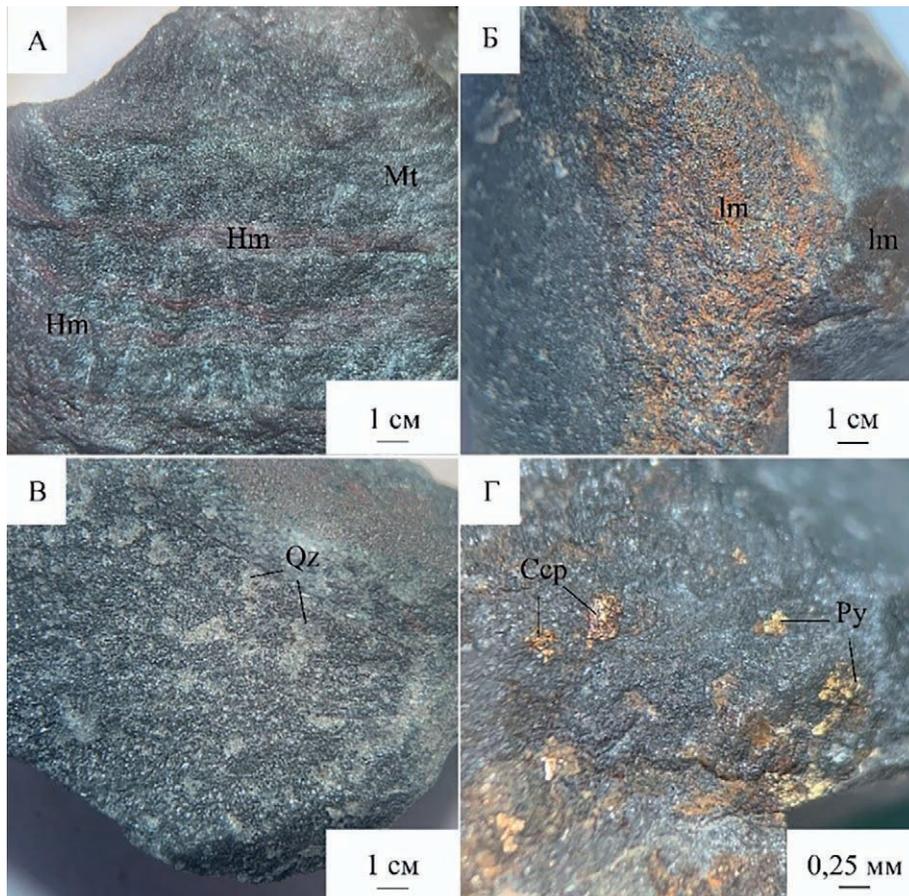


Рис. 1. Образцы железистых кварцитов Стойленского месторождения
 Fig. 1. Samples of ferruginous quartzites from the Stoilensky deposit

и амфиболов. В обломках пород отчетливо прослеживается полосчатая текстура, выраженная чередованием прослоев кварца, магнетита и гематита (рис. 1, А). Мощность прослоев рудных минералов в среднем 0,1–0,5 мм, иногда достигает 3 мм. Размер выделений рудных минералов колеблется от 0,1 до 0,5 мм. По поверхности обломков развиты пленки гидроксидов железа (рис. 1, Б) и встречаются гнездовые выделения кварца (рис. 1, В).

В результате микроскопического исследования шлифов установлено, что изучаемая порода представляет собой железистый кварцит с гомеобластовой структурой и полосчатой текстурой. Полосчатая текстура в изучаемых образцах выражена чередованием темных (представлены рудными минералами) и светлых (представленных нерудными минералами) слоев. Рудные слои имеют магнетитовый и гематитовый составы, нерудные – кварцевый, карбонатный и хлорит-биотитовый. Также отмечаются слои смешанного типа. Нерудные слои представлены мозаичным кварцем и имеют значительное количество включений рудных минералов. По параметрам мощности рудные слои относятся к тонкослоистому (0,1–3 мм) и микрослоистому (0,05–0,1 мм) типам [Грицай и др., 1974].

В результате минераграфических исследований установлено, что рудные минералы железа представлены магнетитом и гематитом.

Магнетит визуализируется в виде прожилков и неравномерной вкрапленности в тесной ассоциации с гематитом, кварцем и кар-

бонатами. Зерна магнетита имеют неправильную форму. Мощность прожилков колеблется от 0,05 до 3 мм (преобладающий размер от 0,1 до 0,2 мм), размеры вкраплений – от 0,002 до 0,1 мм (в среднем от 0,01 до 0,05 мм).

Гематит наблюдается в виде прожилков и неравномерной вкрапленности, имеет неправильную форму зерен. Мощность прожилков колеблется от 0,05 до 0,3 мм (преобладающий размер от 0,1 до 0,15 мм), размеры вкраплений – от 0,002 до 0,1 мм (в среднем от 0,03 до 0,05 мм). Прожилки магнетита и гематита показаны на рис. 2, выделения магнетита и гематита в межзерновом пространстве кварца – на рис. 3.

Ввиду того что магнетит является сильным ферромагнетиком ($\chi = (20000-93000) \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$) и обладает ярко выраженными магнитными свойствами, а гематит, также относящийся к группе минералов-ферромагнетиков, обладает значительно более низкой магнитной восприимчивостью ($\chi = (50-300) \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$) [Технологические..., 2005], чем у магнетита, комплексное извлечение данных минералов магнитными методами не представляется возможным, в связи с чем в настоящее время гематит уходит в хвосты обогащения.

Для улучшения показателей обогащения технологической схемы, основанной на использовании магнитной сепарации в качестве основного метода обогащения (выделение концентрата по магнитной восприимчивости минералов), логично добавить в процесс разделение с использованием гравитационных свойств

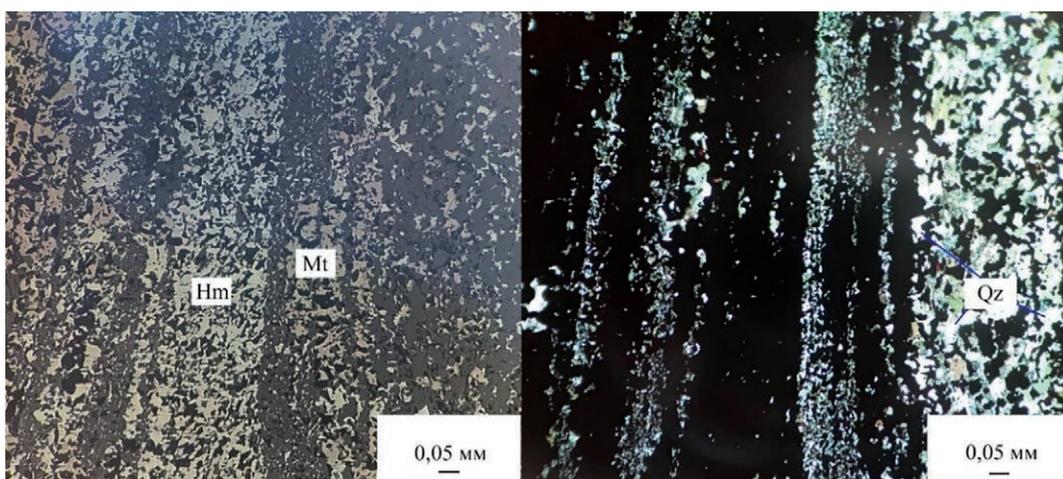


Рис. 2. Микрофотография прожилков магнетита и гематита.

Здесь и на рис. 3 – комбинированный шлиф: А – отраженный свет, николи ||; Б – проходящий свет, николи ||

Fig. 2. Micrograph of magnetite and hematite veins

Here and in Fig. 3 – combined thin section: А – reflected light, Nicol ||; В – transmitted light, Nicol ||

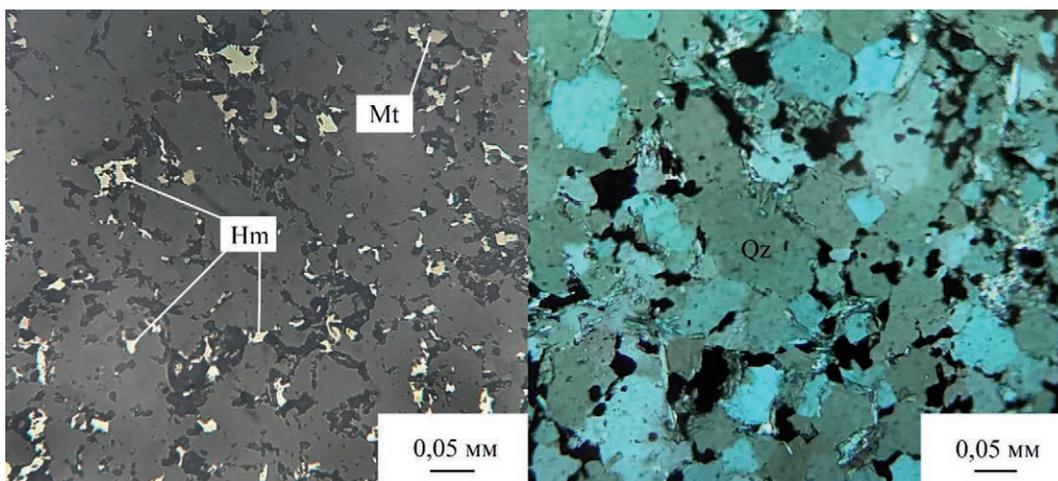


Рис. 3. Микрофотография вкрапленности магнетита и гематита в породе
 Fig. 3. Micrograph of the magnetite and hematite grains in the rock

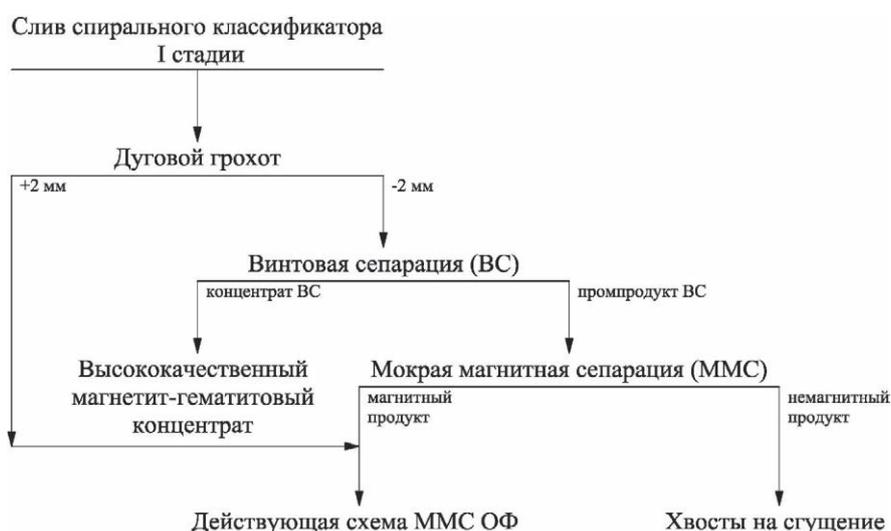


Рис. 4. Технологическая схема лабораторных испытаний
 Fig. 4. Technological scheme of the laboratory tests

минералов. У магнетита и гематита имеется один общий признак разделения – плотность, у магнетита она составляет $4,9\text{--}5,2 \text{ г/см}^3$, у гематита – $4,3\text{--}5,3 \text{ г/см}^3$. У породообразующих минералов, представленных силикатами, кварцем и карбонатами, плотность составляет $1,9\text{--}2,8 \text{ г/см}^3$. Разница в плотности магнетита и гематита, с одной стороны, и породообразующих минералов, с другой стороны, в среднем составляет $2,5 \text{ г/см}^3$. Этот фактор является определяющим при решении вопроса использования гравитационных методов обогащения, в том числе ВС [Прокопьев и др., 2021].

С целью снижения потерь железа с хвостами и повышения качества концентрата, производимого ОФ Стойленского ГОКа, в лаборатории ТПИ ООО НПК «Спирит» изучена

возможность получения высококачественного магнетит-гематитового концентрата методом ВС на начальных стадиях обогащения, т. е. до применения магнитных методов обогащения. Испытания проводились на материале слива спирального классификатора I стадии по схеме, представленной на рис. 4.

Гранулометрическая и химическая характеристики питания винтовой сепарации представлены в табл. 1.

Массовая доля железа в исходном питании винтовой сепарации составила 34,71 %. Распределение ценного компонента по классам крупности однородное. Увеличение массовой доли железа в сравнении с исходным (34,71 %) наблюдается в крупности материала менее 0,25 мм и составляет 38,08 %. Мине-

Таблица 1. Гранулометрическая и химическая характеристики питания винтовой сепарации (подрешетный продукт дугового грохота)

Table 1. Granulometric and chemical characteristics of the spiral separation feed (undersize product of the arc screen)

Класс крупности, мм Size class, mm	Выход, % Output, %	Массовая доля железа, % Mass fraction of iron, %	Распределение железа, % Iron distribution, %
-2 + 1	17,47	29,21	14,70
-1 + 0,5	19,16	31,05	17,15
-0,5 + 0,25	12,81	34,34	12,68
-0,25 + 0,125	9,69	36,80	10,27
-0,125 + 0,071	8,87	41,23	10,54
-0,071 + 0,045	10,47	42,37	12,78
-0,045 + 0,02	7,71	37,28	8,28
-0,02 + 0,0	13,82	34,16	13,60
Итого Total	100,00	34,71	100,00

ральный состав пробы приведен на рис. 5, распределение магнетита и гематита по классам крупности – на рис. 6.

Изучение распределения магнетита и гематита (рис. 6) показало, что основная масса магнетита (56,05 %) концентрируется в материале крупностью от 0,125 до 2 мм, а основная масса гематита (96,76 %) – в материале крупностью менее 0,25 мм. Анализ раскрытия минералов железа (табл. 2 и 3) показал, что раскрытие магнетита и гематита достигается при крупности материала менее 0,125 мм, полное раскрытие наступает при крупности менее 0,071 мм.

Установлено, что нераскрытые зерна магнетита в основном представлены его полиминеральными сростками с кварцем и карбонатами, реже отмечаются бинарные сростки магнетита с кварцем. Сростки гематита также чаще всего представлены полиминеральным типом с кварцем и карбонатами и бинарным с кварцем. Следует отметить, что в материале пробы также присутствуют бинарные и полиминеральные сростки магнетита с гематитом. По качеству сростки минералов железа (магнетита и гематита) в основном представляют собой рядовые, реже бедные сростки и включения.



Рис. 5. Минеральный состав пробы питания винтовой сепарации

Fig. 5. Mineral composition of the spiral separation feed



Рис. 6. Гистограмма распределения магнетита и гематита по классам крупности
 Fig. 6. Histogram of the magnetite and hematite distribution by size classes

Таблица 2. Характер раскрываемости магнетита

Table 2. Features of the magnetite disclosure

Класс крупности, мм Size class, mm	Выход, % Output, %	Магнетит Magnetite						Итого Total
		Своб., % отн. Free, % rel.	Типы сростков, % отн. Types of intergrowths, % rel.					
			Бог., 98 %* High-gr., 98 %*	Ряд., 51 %* Medium-gr., 51 %*	Бедн., 18 %* Low-gr., 18 %*	Вкл., 2,5 %* Incl., 2,5 %*	Полиминеральные и бинарные сростки Mt+Hm Polyminerals and binary intergrowths Mt+Hm	
-2 + 1	17,47	-	-	78,71	15,25	3,35	2,69	100,00
-1 + 0,5	19,16	0,33	9,15	59,18	22,40	7,25	1,69	100,00
-0,5 + 0,25	12,81	2,00	12,63	49,88	12,47	22,19	0,83	100,00
-0,25 + 0,125	9,69	12,86	23,69	21,31	18,09	24,05	-	100,00
-0,125 + 0,071	8,87	89,57	-	-	0,99	9,44	-	100,00
-0,071 + 0,045	10,47	100,00	-	-	-	Ед. зн.	-	100,00
-0,045 + 0,020	7,71	100,00	-	-	-	-	-	100,00
-0,020 + 0,0	13,82	100,00	-	-	-	-	-	100,00

Примечание. Здесь и в табл. 3: * – среднее содержание магнетита в сростке. Своб. – свободные зерна, Бог. – богатые, Ряд. – рядовые, Бедн. – бедные, Вкл. – включения.

Note. Here and in Tab. 3: * – average content in the intergrowth. Free – free grains, High-gr. – high-grade (rich), Medium-gr. – medium-grade, Low-gr. – low-grade, Incl. – inclusions.

Таким образом, можно сделать вывод, что дальнейшее измельчение материала может повлечь за собой значительное переошламование магнетита и особенно гематита, который обладает более тонкой в сравнении с магнетитом крупностью. Перед проведением операций доизмельчения и раскрытия рудных минералов необходимо извлечь свободные зерна магнетита и гематита, а также их богатые сростки в коллективный концентрат. Для достижения этой цели

применена винтовая сепарация, за счет которой массовая доля железа была повышена в 2 раза (до 69,96 %) по сравнению с исходным питанием (питание ВС – 34,71 %). При этом прирост содержания железа наблюдается практически равномерно по всем классам крупности (рис. 7). Минералогическим анализом в концентрате винтовой сепарации установлено повышение содержания магнетита до 92,61 % по сравнению с исходным (содержание магнетита в питании

Таблица 3. Характер раскрываемости гематита

Table 3. Features of the hematite disclosure

Класс крупности, мм Size class, mm	Выход, % Output, %	Гематит Hematite						Итого Total
		Своб., % отн. Free, % rel.	Типы сростков, % отн. Types of intergrowths, % rel.					
			Бог., 98 %* High-gr., 98 %*	Ряд., 51 %* Medium-gr., 51 %*	Бедн., 18 %* Low-gr., 18 %*	Вкл., 2,5 %* Incl., 2,5 %*	Полиминеральные и бинарные сростки Mt+Hm Polymineral and binary intergrowths Mt+Hm	
-2 + 1	17,47	-	-	-	Ед. зн.	2,17	97,83	100,00
-1 + 0,5	19,16	-	-	2,94	2,94	2,94	91,18	100,00
-0,5 + 0,25	12,81	-	-	6,25	12,50	18,75	62,50	100,00
-0,25 + 0,125	9,69	21,88	21,88	12,50	12,50	31,24	-	100,00
-0,125 + 0,071	8,87	96,15	-	-	3,85	-	-	100,00
-0,071 + 0,045	10,47	100,00	-	-	-	-	-	100,00
-0,045 + 0,020	7,71	100,00	-	-	-	-	-	100,00
-0,020 + 0,0	13,82	100,00	-	-	-	-	-	100,00

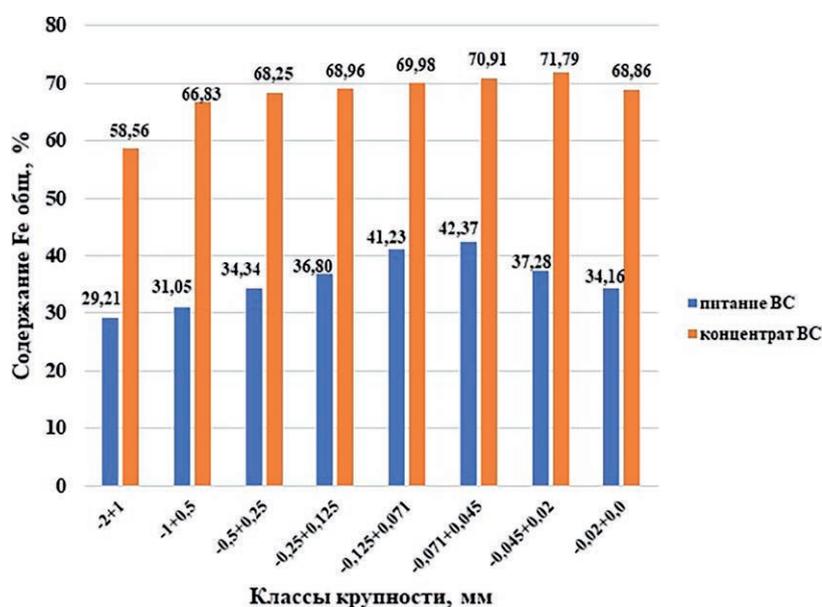


Рис. 7. Сравнительная гистограмма распределения железа по классам крупности в исходном питании и концентрате ВС

Fig. 7. Comparative histogram of the iron distribution by size classes in the feed and spiral separation concentrate

ВС – 43,94 %) и гематита до 4,4 % (содержание гематита в питании ВС – 0,93 %).

Кроме того, в концентрате ВС отмечено пониженное содержание рядовых и бедных сростков рудных минералов, а также включений магнетита в порообразующих минералах, что является очень важным для качества железорудного концентрата, поскольку при проведении магнитной сепарации сростки магнетита с порообразующими минералами, наряду с его свободными зернами, извлекаются в кон-

центрат и разубоживают его. Сростки в основной массе распределяются в промпродукт, который впоследствии может перерабатываться по схеме основного корпуса обогащения ГОКа.

Выводы

Результаты технологических испытаний показали, что при получении высококачественного магнетит-гематитового концентрата методом ВС на начальных стадиях технологи-

ческого процесса обеспечивает общее повышение качества производимого концентрата по содержанию железа в 2 раза (с 34,71 до 69,96 %). Кроме того, выведение из слива спирального классификатора I стадии раскрытых зерен магнетита и гематита позволяет исключить их переошламование и, соответственно, снизить потери железа со шламами, а также способствует уменьшению нагрузки на дальнейшие операции обогащения. При ведении технологических процессов очень важно проводить оперативную оценку качества получаемых продуктов минералогическими методами, так как химические исследования не дают информации о минеральном составе сырья – в частности, не позволяют получить представление о качестве сростков и фазовом распределении железа. Кроме того, небольшое количество железа содержится в некоторых силикатных и карбонатных минералах (до 23,4 % FeO в минералах группы амфиболов, 23,5 % – в анкерите), и, соответственно, их присутствие может увеличивать содержание железа в отвальных продуктах. В этом случае минералогическая оценка поможет обосновать неизбежные потери ценного компонента с хвостами обогащения.

Литература

Башлыкова Т. В., Пахомова Г. А., Ладогов Б. С. Технологические аспекты рационального недропользования: Роль технологической оценки в развитии и управлении минерально-сырьевой базой страны / Науч. ред. Ю. С. Карабасов. М.: МИСиС, 2005. С. 21–37.

References

Bashlykova T. V., Pakhomova G. A., Ladogov B. S. Tekhnologicheskie aspekty ratsional'nogo nedropol'zovaniya: Rol' tekhnologicheskoi otsenki v razviti i upravlenii mineral'no-syr'evoi bazoi strany [Technological aspects of rational subsoil use: The role of technological assessment in the development and management of the country's mineral resource base]. Ed. Yu. S. Karabasov. Moscow: MISiS, 2005. P. 21–37.

Gritsai Yu. L., Pedan M. V., Tokhtuev G. V., Shapovnikov V. A. Geologo-petrograficheskaya otsenka zhelezistykh kvartsitov Krivogo Roga dlya tekhnologicheskikh tselei [Geological and petrographic evaluation of ferruginous quartzites of Krivoy Rog for technological purposes]. Preprint IGFM-74. Kiev, 1974. 52 p.

Zhelezorudnaya baza Rossii [Iron ore base of Russia]. Ed. V. P. Orlov. 2nd ed., rev. exp. Moscow: Geoinformmark, 2007. P. 329–334.

Mineragraficheskoe izuchenie rud: metodicheskie rekomendatsii № 194 [Mineragraphic study of ores: guidelines no. 194]. Nauch. sovet po metodam mineralogicheskikh issled. (NSOMMI) [Sci. Council for Mineralogical Research Methods]. Moscow: VIMS, 2018. 39 p.

Виды и последовательность минералогических исследований при сопровождении технологических работ. Железные руды: методические рекомендации № 181 / Научный совет по методам минералогических исследований (НСОММИ). М.: ВИМС, 2014. 38 с.

Грицай Ю. Л., Педан М. В., Тохтуев Г. В., Шаповников В. А. Геолого-петрографическая оценка железистых кварцитов Кривого Рога для технологических целей // Препринт ИГФМ-74. Киев, 1974. 52 с.

Железорудная база России (изд. 2-е, с доп. и изм.) / Под ред. В. П. Орлова. М.: Геоинформмарк, 2007. С. 329–334.

Минерографическое изучение руд: методические рекомендации № 194 / Научный совет по методам минералогических исследований (НСОММИ). М.: ВИМС, 2018. 39 с.

Пирогов Б. И., Ожогина Е. Г. Принципы и методы технологической минералогии при переработке твердых полезных ископаемых // Вестник геонаук. 2020. № 2. С. 11–14. doi: 10.19110/geov.2020.2.2

Прокопьев С. А. Технология стадийного выделения магнетитового концентрата с помощью винтовой сепарации: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2019. 161 с.

Прокопьев С. А., Прокопьев Е. С., Емельянова К. К., Напольских С. А. Получение высококачественного магнетит-гематитового концентрата методом винтовой сепарации // Горный журнал. 2021. № 6. С. 86–90. doi: 10.17580/gzh.2021.06.07

Целюк Д. И., Жукова В. Е., Ожогина Е. Г., Якушина О. А., Целюк Н. Н. Минералого-технологические особенности хвостов мокрой магнитной сепарации железных руд и перспективы извлечения из них железа // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2013. № 4. С. 412–424.

Поступила в редакцию 21.09.2021

Pirogov B. I., Ozhogina E. G. Printsipy i metody tekhnologicheskoi mineralogii pri pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh [Principles and methods of technological mineralogy in the processing of solid minerals]. *Vestnik geonauk* [Bull. Geosciences]. 2020. No. 2. P. 11–14. doi: 10.19110/geov.2020.2.2

Prokop'ev S. A. Tekhnologiya stadial'nogo vydeleniya magnetitovogo kontsentrata s pomoshch'yu vintovoi separatsii [Technology of staged magnetite concentrate separation using spiral separation]: Summary of PhD (Cand. of Tech.) thesis. Ekaterinburg, 2019. 161 p.

Prokop'ev S. A., Prokop'ev E. S., Emel'yanova K. K., Napol'skikh S. A. Poluchenie vysokokachestvennogo magnetit-gematitovogo kontsentrata metodom vintovoi separatsii [High-quality magnetite-hematite concentrate production by the spiral separation]. *Gornyi zhurn.* [Mining J.]. 2021. No. 6. P. 86–90.

Tseliuk D. I., Zhukova V. E., Ozhogina E. G., Yakushina O. A., Tseliuk N. N. Mineralogo-tekhnologicheskie osobennosti khvostov mokroi magnitnoi separatsii zheleznykh rud i perspektivy izvlecheniya iz nikh zheleza [Mineralogical and technological features of the iron

ores wet magnetic separation tailings and the prospects for extracting iron from them]. *Zhurn. SFU. Tekhnika i tekhnol.* [J. Siberian Fed. Univ. Engineering & Technol.]. 2013. No. 4. P. 412–424.

Vidy i posledovatel'nost' mineralogicheskikh issledovaniy pri soprovozhdenii tekhnologicheskikh rabot. *Zheleznye rudy: metodicheskie rekomendatsii № 181*

[Types and sequence of mineralogical studies accompanied by technological work. Iron ores: guidelines no. 181]. *Nauch. sovet po metodam mineralogicheskikh issled. (NSOMMI)* [Sci. Council for Mineralogical Research Methods]. Moscow: VIMS, 2014. 38 p.

Received September 21, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Чикишева Татьяна Александровна

руководитель минералогической группы
ООО НПК «Спирит»
ул. Лермонтова, 128, корп. 2, оф. 305, Иркутск,
Россия, 664033

старший преподаватель кафедры полезных ископаемых
Иркутский государственный университет
ул. К. Маркса, 1, Иркутск, Россия, 664003

инженер отдела комплексного использования
минерального сырья
Институт земной коры СО РАН
ул. Лермонтова, 128, Иркутск, Россия, 664033
эл. почта: cta@spirit-irk.ru
тел.: (3952) 243280, (3952) 428562

Емельянова Ксения Константиновна

инженер-обогадитель
ООО НПК «Спирит»
ул. Лермонтова, 128, корп. 2, оф. 305, Иркутск,
Россия, 664033
эл. почта: ekk@spirit-irk.ru
тел.: +79086568644

Прокопьев Сергей Амперович

начальник отдела комплексного использования
минерального сырья, к. т. н.
Институт земной коры СО РАН
ул. Лермонтова, 128, Иркутск, Россия, 664033

председатель совета директоров
ООО НПК «Спирит»
ул. Лермонтова, 128, корп. 2, оф. 305, Иркутск,
Россия, 664033
эл. почта: psa@spirit-irk.ru
тел.: +79148892931

Прокопьев Евгений Сергеевич

директор по технологиям и инновациям
ООО НПК «Спирит»
ул. Лермонтова, 128, корп. 2, оф. 305, Иркутск,
Россия, 664033

инженер отдела комплексного использования
минерального сырья,
Институт земной коры СО РАН
ул. Лермонтова, 128, Иркутск, Россия, 664033
эл. почта: pes@spirit-irk.ru
тел.: +79149318317

Турецкая Нина Юрьевна

руководитель группы обогащения черных металлов
ООО НПК «Спирит»
ул. Лермонтова, 128, корп. 2, оф. 305, Иркутск,
Россия, 664033
эл. почта: tny@spirit-irk.ru
тел.: (3952) 243280

CONTRIBUTORS:

Chikisheva, Tatiana

LLC Research and Production Company Spirit
128 Lermontov St., 664033 Irkutsk, Russia

Irkutsk State University
1 K. Marx St., Irkutsk, 664003 Irkutsk, Russia

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian
Academy of Sciences
128 Lermontov St., 664033 Irkutsk, Russia
e-mail: cta@spirit-irk.ru
tel.: (3952) 243280, (3952) 428562

Emelyanova, Kseniya

LLC Research and Production Company Spirit
128 Lermontov St., 664033 Irkutsk, Russia
e-mail: ekk@spirit-irk.ru
tel.: +79086568644

Prokopiev, Sergey

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian
Academy of Sciences
128 Lermontov St., 664033 Irkutsk, Russia

LLC Research and Production Company Spirit
128 Lermontov St., 664033 Irkutsk, Russia
e-mail: psa@spirit-irk.ru
tel.: +79148892931

Prokopiev, Evgenii

LLC Research and Production Company Spirit
128 Lermontov St., 664033 Irkutsk, Russia

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian
Academy of Sciences
128 Lermontov St., 664033 Irkutsk, Russia
e-mail: pes@spirit-irk.ru
tel.: +79149318317

Turetskaya, Nina

LLC Research and Production Company Spirit
128 Lermontov St., 664033 Irkutsk, Russia
e-mail: tny@spirit-irk.ru
tel.: (3952) 243280

Калинкин Илья Александрович

руководитель группы проектирования, регламентов
и аналитики горно-обогатительных производств
ООО НПК «Спирит»
ул. Лермонтова, 128, корп. 2, оф. 305, Иркутск,
Россия, 664033
эл. почта: kia@spirit-irk.ru
тел.: (3952) 243280

Напольских Сергей Александрович

генеральный директор
АО «Стойленский ГОК»
площадка Фабричная, пр-д 4, Старый Оскол,
Белгородская область, Россия, 309504
эл. почта: info.sgok@nlmk.com
тел.: (4725) 449435

Kalinkin, Ilya

LLC Research and Production Company Spirit
128 Lermontov St., 664033 Irkutsk, Russia
e-mail: kia@spirit-irk.ru
tel.: (3952) 243280

Napolskikh, Sergey

Stoilensky Mining and Processing Plant
4 Fabrichny Proezd, 309504 Stary Oskol,
Belgorod Region, Russia
e-mail: info.sgok@nlmk.com
tel.: (4725) 449435

УДК 553.823 + 553.824

СВОДНЫЙ ОБЗОР МЕСТОРОЖДЕНИЙ И КРУПНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ БЛАГОРОДНЫХ КОРУНДОВ ДОКЕМБРИЯ МИРА

Н. Г. Барнов¹, В. В. Щипцов^{2,3}

¹ Горный институт НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

² Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

³ Петрозаводский государственный университет, Россия

Приводится сводный обзор месторождений и проявлений благородных корундов в рудных районах докембрия мира. Коренные источники месторождений рубинов и сапфиров выделены в две группы. Первая группа представлена магматическими, пегматитовыми и метасоматическими месторождениями, главным образом фанерозоя. Вторая группа по времени формирования в основном относится к докембрийским образованиям. В статье рассматривается образование благородных корундов, связанное с докембрийскими комплексами в границах провинций, поясов и рудных районов, и приводится краткая характеристика корундоносных комплексов в докембрии от неоархейских до неопротерозойских с привязкой к конкретному месторождению или проявлению. Дана схема P-T условий метаморфизма при формировании месторождений корунда, источниками которых являются докембрийские корундоносные метаморфические комплексы докембрия с возрастом от 2,7–2,8 млрд до 610 млн лет.

Ключевые слова: благородные корунды; рубин; сапфир; месторождение; докембрий; метаморфизм.

N. G. Barnov, V. V. Shchiptsov. A SUMMARY OVERVIEW OF DEPOSITS AND LARGE OCCURENCES OF NOBLE PRECAMBRIAN CORUNDUM IN THE WORLD

The paper is a summary review of the deposits and occurrences of noble corundum in Precambrian ore regions of the world. The ore bodies of ruby and sapphire deposits are divided into two groups. The first group comprises magmatic, pegmatite, and metasomatic deposits, mainly of Phanerozoic age. The second group is mainly represented by Precambrian formations. The article considers the formation of noble corundum associated with Precambrian complexes within the borders of provinces, belts and ore regions, and provides a brief description of corundum-bearing complexes in the Precambrian from Neoarchean to Neoproterozoic, with references to the respective deposits or occurrences. We indicate the P-T setup for metamorphism during the formation of corundum deposits from Precambrian corundum-bearing metamorphic complexes aged from 2.7–2.8 Ga to 610 Ma.

Keywords: noble corundum; ruby; sapphire; deposit; Precambrian; metamorphism.

Введение

Рубиновая и сапфировая минерализация зафиксирована более чем в 50 странах мира на всех континентах, кроме Антарктиды, но большинство проявлений имеют лишь историческое или минералогическое значение. В данной статье речь идет только о промышленных или перспективных объектах докембрийских благородных корундов, находящихся в провинциях, поясах или определенных рудных районах мира. В качестве вводной справки необходимо отметить, что наиболее крупными металлогеническими объектами принято считать пояса и провинции [Российский..., 2003]. Минерагеническая провинция – это рудоносная площадь размером в сотни тысяч км², охватывающая крупный блок земной коры. Металлогенический пояс представляет собой рудоносную площадь обычно линейного развития (до 10 000 км в длину при ширине в сотни км), отличающуюся отчетливой линейной ориентировкой. В геологическом отношении условия образования месторождений соответствуют надпорядковым геологическим структурам – платформам и складчатым поясам – или занимают значительную их часть, по площади составляющую сотни тысяч – первые миллионы квадратных километров. Следующими в таксономической иерархии обычно выступают минерагенические районы, как правило, имеющие площадь от первых тысяч до десятков тысяч квадратных километров.

В корундоносных провинциях, поясах и рудных районах определяются моногенетические и полигенетические месторождения. К первым относятся месторождения магматического, пегматитового и собственно метасоматического (постмагматического) происхождения, ко вторым – полихронные и полифациальные собственно метаморфические и метаморфогенно-метасоматические месторождения [Барнов, Мельников, 2015; Барнов и др., 2016].

Первая группа представлена магматическими месторождениями Восточной Австралии, Полярного Урала, российского Дальнего Востока, Восточного Китая, Индокитайского полуострова, Нигерии, Колумбии, штата Монтана (США), пегматитовыми месторождениями Бразилии, метасоматическими месторождениями Кении, Танзании, Малави и др. Вторая группа объединяет однотипные по генезису (метаморфогенно-метасоматические) месторождения Высокой Азии (Мьянма, Таджикистан, Афганистан, Шри-Ланка и другие страны), Восточной Африки (Мадагаскар, ЮАР), Среднего и Южного Урала, Карело-Кольского региона (Россия),

Восточной Бразилии (штат Минас-Жерайс и др.), Северной Каролины (США), Канады, Гренландии. Коренные месторождения благородных корундов второй группы по времени формирования в основном относятся к докембрийским образованиям.

Ниже приводится краткая характеристика этих докембрийских источников благородных корундов с привязкой к провинциям, поясам, рудным районам мира.

Южно-Азиатская сапфир-рубиноносная провинция

Для этой провинции, самой известной в мире благодаря обилию самоцветов, в том числе и благородных корундов, помимо образованных на обширной площади (450 тыс. км²) месторождений благородных корундов области позднемезозойско-кайнозойской складчатости и активизированных в нижнем палеозое, характерно широкое проявление докембрийской рубин-сапфировой минерализации на значительной площади, включающей семь азиатских стран – Афганистан (Jegdalek), Непал (Chumar, Ruyil), Пакистан (Hunza valley, Batakundi), Таджикистан (Turakuloma, Badakhshan), Мьянма (Mogok, Mong Hsu), Индия (Kalahandi, Mysore), Шри-Ланка (Ratnapura, Bakamuna). Докембрийские корундосодержащие пегматиты не имеют промышленного значения.

В Пакистане, у его северо-западной границы с Афганистаном, в окрестностях Тимагра, в 1960 г. открыто более 10 месторождений рубинов в толще мраморов по долине р. Хунза [Gübelin, 1982], в которых отмечено высокое содержание в коренной породе рубинов с размерами кристаллов не более 15 мм. Рубины в мраморах характерны для афганского месторождения Jegdalek вблизи города Сороби. В Индии, например, древнейшие месторождения рубинов известны в штатах Орисса (месторождение Kalahandi) и Карнатака (месторождение Mysore). Там обнаружены непрозрачные рубины в силлиманитовых гнейсах и др. [Буканов, 2014].

Субстрат коренной минерализации благородных корундов докембрия представлен мраморами, гнейсами, чарнокитами, кристаллическими сланцами со ставролитом, кианитом, цоизитом, свидетельствующими о высоких температурах в диапазоне 750–900 °С и повышенном давлении (7–12 кбар) минералообразования. Для рубинов и сапфиров Шри-Ланки абстрактно допускается архейский возраст прозрачных и ярко окрашенных кристаллов корундов [Wells, 1956; Silva, Siriwardena, 1988].

Здесь не только проявлены процессы регионального высокотемпературного метаморфизма гранулитовой и амфиболитовой фаций, но в зонах тектонических напряжений с этими процессами тесно связаны скарнообразование и грейзенизация.

В Южно-Азиатской рубин-сапфиноносной провинции выделяются полигенетические типы месторождений и проявлений, в отличие от типичных магматических и локальных метасоматических месторождений, объединяющихся в моногенетические группы. Месторождения благородных корундов Южно-Азиатской провинции редко сопровождаются связанными с ними россыпями [Giuliani et al., 2020]. Рубины и сапфиры добываются непосредственно из коренных пород, представленных мраморами, кристаллическими сланцами, гнейсами и слюдит-плагиоклазитами на примерах месторождений Таджикистана, Афганистана, Пакистана и Непала [Мельников и др., 2002]. Характерно наличие пурпурно-красных рубинов (типа «голубиная кровь») (Могок) [Iyer, 1953] и рубинов с фиолетово-синим оттенком окраски на месторождениях Таджикистана, Афганистана, Непала и Мьянмы [Буканов, 2014].

Карело-Кольская сапфир-рубиноносная провинция (Россия)

Докембрийская составляющая этой провинции представлена рубиносодержащими породами в составе глубоко метаморфизованных гнейсов и амфиболитов беломорской серии неоархейя Фенноскандинавского щита (месторождение Хитостров, проявления Дядина гора, Варацкое, Нятовара, Перуселька и др.) [Громов, 1993]. По времени образование корундов обязано, вероятно, интенсивно проявленным процессам, связанным со свекофеннской тектоно-магматической активизацией с возрастом 1,9–1,7 млрд лет.

Среди коренных корундоносных объектов метаморфогенного происхождения наиболее известным является месторождение Хитостров в 10 км северо-восточнее поселка Чупа [Терехов, Левицкий, 1991]. Кристаллы корунда образуются здесь в ставролит-биотит-гранат-амфиболовой породе на тектоническом контакте между кианит-гранат-биотитовыми гнейсами и гранатовыми амфиболитами. Появление корундов связывается с базификатами, образованными, по данным геобарометрии, при давлении 7–9 кбар, что объясняется накоплением напряжения в отдельных зонах с высокой глиноземистостью и магнетизальностью [Громов, 1993]. Цвет их сероватрозовый, бледно-розовый, малиновый, основная

масса кристаллов – длиной 1–5 см и в поперечнике до 3 см, непрозрачны, некоторые из них просвечивающие. Корунды рассматриваются как коллекционное сырье.

Восточно-Африканский рубин-сапфиноносный пояс Африканской платформы

Расположен в зоне глубинных разломов и рифтов и структурно приурочен к докембрийской области складчатости Мозамбикского пояса от Кении на севере до ЮАР и острова Мадагаскар на юге. Общая площадь пояса около 25 тыс. км². В этом поясе сосредоточен целый ряд крупных месторождений благородных корундов: Танзания – Umba valley, Longido, Winza Morogoro, Mahenge, Songea, Tunduru; Кения – West Pokot, Baringo, Kitui, Mangare; Малави – Chimwadzulu; Зимбабве – O'Briens; Конго-Киншас – Mbuii-Mavi; ЮАР – Barberton; Мозамбик – Montepuez; Мадагаскар – Maniry, Gogogogo, Vohitany, Ejeda [Saul, 2015; Giuliani et al., 2020]. Геологическая особенность данного пояса заключается в том, что он состоит из стабильных изометричных глубоко метаморфизованных блоков (гнейсо-мигматитовые купола) и узких подвижных метаморфизованных зон. С первыми связаны, например, коренные рубины в мраморах на северо-востоке ЮАР и сапфиры на юге острова Мадагаскар, тогда как большинство других месторождений локализованы в основных и ультраосновных телах, подверженных метасоматическим изменениям на границе химически разнородных пород. Возраст коренной минерализации благородных корундов, как правило, протерозойский.

Для метасоматических месторождений Танзании, Кении, Малави, Зимбабве и других объектов Восточно-Африканского пояса чрезвычайно типична зональность и пестрота окраски рубинов и сапфиров, получивших специальный торговый термин – «пестроцветный сапфир-танзания». Метаморфогенные сапфиры Мадагаскара напоминают по морфологическим особенностям кристаллы сапфира из месторождений индийского Кашмира, близки к рубинам из мраморов ЮАР и к рубинам метаморфических пород Афганистана, Таджикистана, Мьянмы и других стран Южно-Азиатской корундоносной провинции. Рубины из Кении и Танзании удивляют еще со времен их открытия в 60-х годах своим красивым насыщенным цветом, варьирующим от светло- до темно-красных тонов [Буканов, 2014]. Рубины хорошего качества и размера.

Из стран Африки по числу месторождений с благородным корундом лидирует Танзания –

14 месторождений. Наиболее интересное находится у оз. Маньяра, вблизи поселения Маджи-Мото, где вместе с рубином добываются александрит, изумруд и другие самоцветы. В том же районе добывались прекрасные оранжевые сапфиры. Месторождения образованы в гипербазитах, которые обнаружены в сравнительно небольших телах в области распространения гнейсо-амфиболитовых полей протерозойской системы Узагоды. В 1980 г. еще одно месторождение прозрачного рубина открыто в провинции Морогоро, у поселения Махенге, в 100 км к югу от г. Матомбо. Месторождения Umba valley и Longido принадлежат к группе типичных корундовых плагиоклазитов ряда плюмазита-кыштымита и отличаются от грубо- до гигантозернистой структурой и наличием крупных кристаллов благородного корунда [Hintze, 2010].

Помимо Танзании самые значимые месторождения расположены в долине Умба в Кении. В 1974 г. открыто месторождение рубинов между г. Танта-Хилз и Национальным парком «Тсаво» [Simonet, 2000]. К югу от Танзании в Малави выявлено месторождение рубинов Chimwadzulu. Оно находится в 70 км южнее оз. Ньяса в Кении, вблизи границы с Мозамбиком.

В Зимбабве добываются разной окраски сапфиры, в т. ч. зональные – кремово-белые в центре и синие по краям с размером кристаллов до 7 см. Из этой страны на рынок поступают также черные звездчатые сапфиры.

В южной части острова Мадагаскар известны месторождения докембрийских рубинов (Maniry, Gogogogo, Vohitany, Ejeda). Еще одно месторождение рубинов и сапфиров находится в центральной части острова у г. Антанифотси. На юге острова в последние годы выявлены новые месторождения сапфиров в районе городов Бекили, Андранондамбо, Абоасари и Сакара. В 1996 г. на северной оконечности острова, вблизи поселения Амбилубе, в районе г. Амбоудрохефеа, открыто месторождение синих, сине-фиолетовых и коричнево-красных сапфиров с кристаллами длиной до 2 см [Saul, 2015; Giuliani et al., 2020].

Мадагаскарские сапфиры из южных месторождений наиболее похожи на цейлонские, обладают богатой цветовой гаммой, но они значительно отстают от цейлонских по полноте кристаллизации. В них много минеральных и газовых включений, они трещиноваты. Для искусственного лечения трещин и полостей был разработан метод с использованием свинцового стекла. По наличию природных бесцветных и розовых сапфиров Мадагаскар относится к мировым лидерам [Буканов, 2014].

Нигерийский сапфиноносный район

Слабоизученный нигерийский район по геологической позиции весьма близок к охарактеризованным объектам Восточно-Африканского пояса: тот же архейско-протерозойский возраст субстрата коренной сапфировой минерализации, ее положение в зоне крупнейшего регионального глубинного разлома и интенсивные процессы тектоно-метаморфической и магматической активизации, развитые здесь. Коренной источник сапфиров не установлен, предположительно, он магматический [Барнов и др., 2016]. Состав твердых минеральных включений в сапфирах, особенно урансодержащего облучивита, позволяет считать такое предположение весьма вероятным.

Месторождения сапфиров расположены в штате Кадуна в центральной части страны. Сапфиры добываются из четвертичных аллювиальных россыпей. Имеют темно-синий цвет, редко встречаются желтые разновидности. Обрабатываются обычно в виде кабошонов из-за темного цвета, вызванного обилием минеральных и иных включений и дефектов [Kiefert, Schmetzer, 1987; Kanis, Harding, 1990].

Восточно-Бразильский рубин-сапфиноносный пояс

Протягивается почти на 3 тыс. км вдоль Атлантического побережья Бразилии (штаты Баия, Минас-Жерайс, Гояс, Мату-Гросу-ду-Сул) и преимущественно приурочен к архейскому Восточно-Бразильскому щиту, отделенному от Западно-Бразильского щита, где находятся месторождения штата Мату-Гросу [Principais..., 1991]. Восточно-Бразильский щит интенсивно преобразован в процессе вендской активизации на рубеже протерозоя и фанерозоя (650–500 млн лет). В результате породы глубоко метаморфизованы, рекристаллизованы, насыщены интрузивно-реоморфическими гранитами, щелочными и гранитными пегматитами, кварцевыми, полевошпатовыми и карбонатными жильными образованиями.

В Бразилии месторождения и проявления рубинов также известны на реке Парагуачу (аллювиальные россыпи Витория де Конкуиста), а коренная минерализация зафиксирована в метаморфических породах района Камним Гроссо штата Баия, в щелочных пегматитах Пекисе штата Гояс и в метаморфических толщах Гуанхейес и Багуари штата Минас-Жерайс. Сапфиры встречаются на россыпных месторождениях Джауру Каксино, Фоги, Индиана, Грик и других в штате Минас-Жерайс, месторожде-

ниях Малакахета и Диамантина в штате Мату Гросу, в щелочных пегматитах Пеиксе в штате Гояс и Ладжес в штате Санта-Катарина. Окраска рубинов красная, розовая, сапфиров – светло-голубая, реже синяя, серовато-синяя. Таким образом, в Бразилии фиксируются два генетических источника благородных корундов – щелочно-пегматитовый и метаморфогенный.

Восточно-Американский рубиноносный район

Географически район расположен в Северной Каролине. Рубины фиксируются только в современных аллювиальных рубиноносных песчано-гравийных мелких россыпях бассейна р. Малая Теннесси (Corundum Hill, Cowee Valley, Buck Creek) [Steven, Youkovich, 1985]. Цвет рубинов красный, с интенсивным плеохроизмом. В ограниченном виде кристаллы редко превышают вес, равный 1–2 каратам. Коренными источниками рубинов Северной Каролины рассматриваются корундосодержащие докембрийские гнейсы, кристаллические сланцы, другие метаморфические породы и, возможно, генетически связанные с ними плагиоклазиты.

Канадский рубин-сапфиросный район

Находки и мелкие месторождения благородных корундов сосредоточены в провинциях Онтарио и Квебек, территория которых сложена архейскими и нерасчлененными докембрийскими породами.

Месторождения сапфиров (реже рубинов) связаны с корундовыми сиенитами и сиенит-пегматитами, образующими жилы и дайки в толщах гранитогнейсов и гнейсов вблизи контактов их с массивами щелочных и нефелиновых сиенитов. Наиболее известным из них является месторождение Revelstoke [Dzikowski et al., 2014].

Гренландский юго-западный рубиноносный пояс

Гренландия представляет собой крупнейший остров между Атлантическим и Северным Ледовитым океанами, более 80 % территории которого покрыто льдами. Породы, слагающие гренландскую часть Канадского щита, представлены мраморами, кристаллическими сланцами, гнейсами, гранитогнейсами, кварцитами и гранитами архейского и палеопротерозойского возрастов, с несогласием перекрытыми вулканогенно-осадочными толщами мезопротерозоя. С архейско-палеопротерозойски-

ми метаморфическими комплексами связаны проявления и месторождения благородных корундов и драгоценных металлов (золота и серебра) [Garde, Marker, 1988]. На западе кристаллический массив выходит из-под льдов на дневную поверхность, образуя в среднем 200-километровый пояс плоскогорий и горных хребтов на побережье моря Баффина.

Комплекс Фискенессет с возрастом 2,97 млн лет является одной из наиболее хорошо сохранившихся расслоенных многофазных архейских интрузий в мире. Он состоит из анортозита, лейкогаббро, габбро и метаморфизованных ультрабазитов [Polat et al., 2010]. Несмотря на метаморфизм амфиболитовой и гранулитовой фаций, пик которого приходится на 2,80 млрд лет, первичные кумулятивные текстуры и магматические реликты хорошо сохранились в этом комплексе. Метаморфические процессы, приведшие к формированию тектоно-метаморфических зон с проявлениями и месторождениями благородно-корундовой минерализации, сопоставимы с метаморфическими сериями гранулитового и амфиболитового метаморфизма Канадского и Фенноскандинавского щитов [Fagan, 2018].

Рубины из комплекса Фискенессет отличаются высоким содержанием Cr, промежуточным содержанием Fe, низким содержанием V, Ga и Ti, низким содержанием изотопов кислорода (1,6–4,2 %), редкими минеральными включениями (например, антофиллит+биотит).

В настоящее время на юго-западе Гренландии открыто перспективное месторождение рубинов и розовых сапфиров. После оценки горно-геологических, технологических, экономических и экологических условий эксплуатации месторождения в результате совместной работы правительства Гренландии и международных экспертов канадской компании «True North Gems-TNG» выдано разрешение на начало проходки шахты по добыче благородных корундов [Барнов и др., 2016].

Рудник Aappaluttoq находится на юго-западном побережье Гренландии в 160 км к югу от столицы Нуук и в 15 км юго-восточнее поселения Фискенессет [Fagan, 2018]. Месторождение и сам рудник имеют название, в переводе с гренландского означающее «красная гора», что свидетельствует о давней известности находок «красного» (красивого) минерала корунда местными жителями в данном районе.

Горные породы в районе месторождения Aappaluttoq – архейского возраста, интенсивно смяты в изоклинальные складки с близширотной ориентировкой их осей и осложненные многочисленными тектоническими нарушениями.

В районе Фискенесет обнаружено более 30 новых находок кристаллов рубинов и розовых сапфиров и более крупных их проявлений в коренных докембрийских горных породах и родственных россыпях [Keulen et al., 2020]. Прогнозные запасы благородных корундов месторождения Aappaluttoq, по оценкам независимых экспертов, составляют 340–400 млн каратов, что выводит его в разряд уникальных объектов мирового значения. Срок эксплуатации месторождения составит 30–40 лет. Находки отдельных кристаллов и проявлений рубиновой и сапфировой минерализации различного масштаба концентрируются вдоль крупного регионального разлома в породах анортозит-метагаббрового состава.

Роль метаморфизма при образовании благородных корундов и краткие замечания по возрасту

Специфика условий метаморфизма отражена на рисунке, на котором представлены P-T поля: (1) месторождения в мраморах Mong Hsu [Peretti et al., 1996], Luc Yen и Jegdalek [Garnier et al., 2008], Hunza [Okrusch et al., 1976], Revelstoke [Dzikowski et al., 2014], Mahenge [Balmer et al., 2017] показаны прямоугольниками черного цвета и (2) докембрийские корундсодержащие месторождения и проявления ультрабазит-базитового комплекса и метаморфические *sensu stricto* или связанные с метаморфизмом и метасоматозом показаны прямоугольниками серого цвета: Гренландия – Kangerdluarssuk [Garde, Marker, 1988], Aappaluttoq [Fagan, 2018; Keulen, 2020]; Южная Кения [Key, Ochieng, 1991; Simonet, 2000]; Montepuez [Fanka, Sutthirat, 2018]; Mangare [Mercier et al., 1999]; Winza [Schwarz et al., 2008], North Carolina [Tenthorey et al., 1996] и Vohibory [Rakotondrazafy et al., 2008].

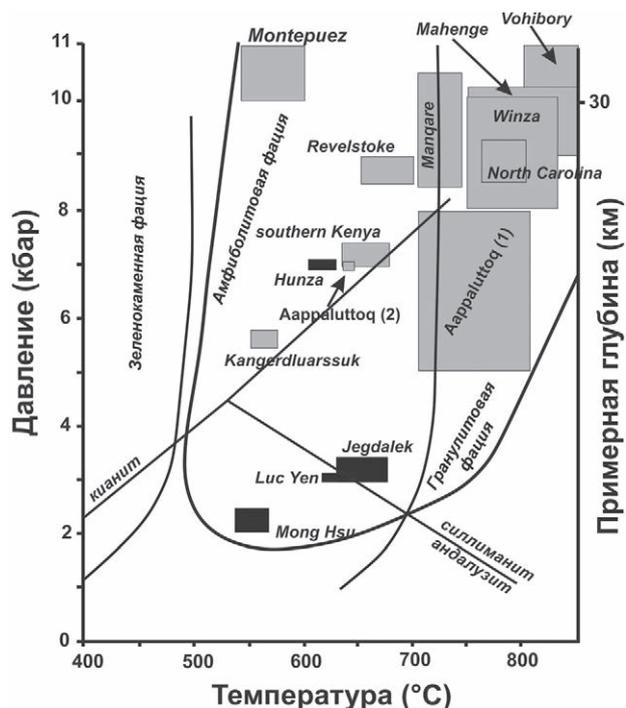
Разными методами датирования (в основном U-Pb методом по цирконам) были определены четыре основных периода образования корунда во всем мире [Giuliani et al., 2020]. Здесь даются комментарии к первой возрастной группе – докембрийской. К сожалению, определенные данные о датировании комплексов, содержащих древние корунды, незначительны. Относительный возраст обсуждается по геологическим результатам исследований, включая условия метаморфизма.

Месторождение Aappaluttoq в Гренландии сформировалось в архее, где рубин датируется как архейский. Если изохрону Pb-Pb, определенную по цирконам Aappaluttoq, интерпретировать как возраст перекристаллизации корун-

да в благородный корунд, то возраст согласуется с событиями региональной геологической обстановки. Месторождение рубинов Aappaluttoq образовалось 2.97–2.6 Ga [Polat et al., 2010]. В настоящее время этот объект имеет самый древний возраст.

Образование метаморфогенных корундов, источников промышленного сырья, на Канадском и Фенноскандинавском щитах связано с процессами тектоно-магматической активизации в палеопротерозое (Северная Карелия – свекофеннский этап активизации).

Основным периодом формирования благородных корундов был панафриканский орогенез (750–450 млн лет назад) (табл.). Сюда входят месторождения рубинов и сапфиров в поясе драгоценных камней Восточной Африки, Индии, Шри-Ланки [Giuliani et al., 2014], связанные с коллизионными процессами между Восточной и Западной Гондваной во время



P-T условия метаморфизма при формировании месторождений корунда [Simonet et al., 2008; Giuliani et al., 2014].

P-T поля рубинового и розового корундов в клинопироксенитах и ксенолитах в метагаббро-ксенолитах, связанных с щелочными базальтами, не показаны. Приведены схематические поля зеленокаменной, амфиболитовой и гранулитовой фацций

P-T formation conditions of metamorphic gem ruby [Simonet et al., 2008; Giuliani et al., 2014].

The P-T fields of ruby and pink corundum in clinopyroxenites and metagabbro xenoliths associated with alkali basalts are not shown. The schematic fields of Greenschist, Amphibolite, and Granulite facies are given

Таблица возрастов корундоносных комплексов докембрия по данным результатов U-Pb датирования циркона
Table of ages of corundum-bearing Precambrian complexes according to the results of U-Pb dating of zircon

№	Месторождение, страна Deposit, country	Возраст Age	Источник Sources
1	John Saul, Кения / Kenya	612 ± 6 млн лет 612 ± 6 Ma	Saul, 2015
2	Longido, Танзания / Tanzania	610 ± 6 млн лет 610 ± 6 Ma	Le Goff et al., 2010
3	Vohibory, Мадагаскар / Madagascar	612 ± 5 млн лет 612 ± 5 Ma	Jons, Schenk, 2008
4	Aappaluttoq, Гренландия / Greenland	2.97–2.6 Ga	Polat et al., 2010

панафриканских тектонико-метаморфических событий [Kroner, 1984]. Данные результатов U-Pb датирования циркона из рудника John Saul в Кении (612 ± 6 млн лет [Saul, 2015]), Longido в Танзании (610 ± 6 млн лет [Le Goff et al., 2010]) и месторождения Vohibory на Мадагаскаре (612 ± 5 млн лет [Jons, Schenk, 2008]) подтверждают периоды формирования, связанные с восточноафриканским орогенезом.

Заключение

Проведенная систематизация и обобщение имеющихся материалов и собственных данных по докембрийским источникам месторождений благородных корундов мира позволяют констатировать, что месторождения метаморфогенного типа в целом значительно древнее по отношению к трем более молодым возрастным группам месторождений благородных корундов мира. Их возраст определяется как архейский в Гренландии, архей-протерозойский в Южной Азии (Индия, Шри-Ланка, Таджикистан и др.), палеопротерозойский в Канаде и Карелии (Россия), протерозойский в Северной Каролине (США) и венд в Восточной Африке (ЮАР, Кения, Танзания, Мадагаскар), Нигерии и Бразилии.

Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР 210 ИГ КарНЦ РАН 121040600173–1.

Литература

Барнов Н. Г., Мельников Е. П., Викторов М. А. Минералогия месторождений благородных корундов мира // Отечественная геология. 2016. № 1. С. 39–45.
Барнов Н. Г., Мельников Е. П. Генетические типы благородных корундов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 6. С. 79–85.
Буканов В. В. Цветные камни и коллекционные минералы. Энциклопедия. СПб.: Ottava Book Printing, 2014. 464 с.

Громов А. В. Розовый корунд из Хитостровского проявления в Северной Карелии // Мир камня. 1993. № 2. С. 1–3.

Мельников Е. П., Васильев А. В., Викторов М. А. Нетрадиционная генетическая типизация месторождений и свойства благородных корундов // Вестник геммологии. 2002. № 2. С. 7–18.

Российский металлогенический словарь. СПб.: ВСЕГЕИ, 2003. 320 с.

Терехов Е. Н., Левицкий В. И. Геолого-структурные закономерности размещения корундовой минерализации в северо-западном Беломорье // Изв. вузов. Геол. и разведка. 1991. № 6. С. 3–13.

Balmer W. A., Hauzenberger C. A., Fritz H., Sutthirat C. Marble-hosted ruby deposits of the Morogoro region, Tanzania // J. Afr. Earth. Sci. 2017. No. 134. P. 626–643. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2017.07.026

Dzikowski T. J., Cempirek J., Groat L. A., Dipple G. M., Giuliani G. Origin of gem corundum in calcite marble: The Revelstoke occurrence in the Canadian Cordillera of British Columbia // Lithos. 2014. P. 198–199, 281–297. doi: 10.1016/j.lithos.2014.03.030

Fagan A. J. The ruby and pink sapphire deposits of SW Greenland: Geological setting, genesis, and exploration techniques: PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 2018.

Fanka A., Sutthirat C. Petrochemistry, mineral chemistry, and pressure-temperature model of corundum-bearing amphibolite from Montepuez, Mozambique // Arab. J. Sci. Eng. 2018. No. 43. P. 3751–3767. doi: 10.1007/s13369-018-3172-8

Garde A., Marker M. Corundum crystals with blue-red color zoning near Kangerdluarssuk, Sukkertoppen district, West Greenland // Rep. Gronl. Geol. Unders. 1988. Vol. 140. P. 46–49.

Garnier V., Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A. E., Dubessy J., Banks D., Vinh H. Q., Lhomme T., Maluski H., Pêcher A., Bakhsh K. A., Long P. V., Trinh Ph. T., Schwarz D. Marble-hosted ruby deposits from central and Southeast Asia: Towards a new genetic model // Ore Geol. Rev. 2008. Vol. 34. P. 169–191. doi: 10.1016/j.oregeorev.2008.03.003

Giuliani G., Groat L., Fallick A., Pignatelli I., Pardieu V. Ruby deposits: A review and geological classification // Mineralogy and Geochemistry of Ruby. Minerals. 2020. Vol. 10(7). Art. 597. doi: 10.3390/min10070597

Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A. E., Groat L., Fagan J. The geology and genesis of gem corundum

deposits // *Geology of Gem Deposits* / Ed. L. A. Groat. Tucson, AZ, USA: Mineralogical Association of Canada, 2014. Short Course Series. Vol. 44. P. 29–112.

Gübelin E. J. Die Edelsteinvorkommen Pakistans: Rubine aus dem Hunzatal // *Lapis*. 1982. Vol. 7, no. 5. P. 19–31. (In German)

Hintze J. Safari ndjema – Afrikanisches Tagebuch (II): Rubin in Zoisit – ein Klassiker aus Longido in Tansania // *Lapis*. 2010. Vol. 35(12). P. 15–19 (In German).

Iyer L. A. N. The geology and gemstones of the Mogok stone tract, Burma // *Memoirs of the Geological Survey of India*. 1953. Vol. 82. P. 7–100.

Jons N., Schenk V. Relics of the Mozambique Ocean in the central East African Orogen: Evidence from the Vohibory Block of Southern Madagascar // *J. Metam. Geol.* 2008. Vol. 26. P. 17–28. doi: 10.1111/j.1525-1314.2007.00745.x

Kanis J., Harding R. R. Gemstone prospects in central Nigeria // *J. Gemmol.* 1990. Vol. 22, no. 4. P. 195–202.

Keulen N., Thomsen T. B., Schumacher J. C., Poulsen M. D., Kalvig P., Vennemann T., Salimi R. Formation, origin and geographic typing of corundum (ruby and pink sapphire) from the Fiskenasset complex, Greenland // *Lithos*. 2020. Vol. 366–367. Art. 105536. doi: 10.1016/j.lithos.2020.105536

Key R. M., Ochieng J. O. The growth of rubies in south-east Kenya // *J. Gemmol.* 1991. Vol. 22. P. 484–496.

Kiefert L., Schmetzer K. Blue and yellow sapphire from Kaduna Province, Nigeria // *J. Gemmol.* 1987. Vol. 20, no. 7/8. P. 427–442.

Kröner A. Late Precambrian plate tectonics and orogeny: a need to redefine the term Pan-African // Klerkx J., Michot J. (eds) *African geology*. Musée Royal L'Afrique Centrale. Tervuren, Belgium, 1984. P. 23–28.

Le Goff E., Deschamps Y., Guerrot C. Tectonic implications of new single zircon Pb-Pb evaporation data in the Lossogonoi and Longido ruby-districts, Mozambican metamorphic Belt of north-eastern Tanzania // *Comptes Rendus Geosci.* 2010. Vol. 342. P. 36–45. doi: 10.1016/j.crte.2009.10.003

Mercier A., Debat P., Saul J. M. Exotic origin of the ruby deposits of the Mangari area in SE Kenya // *Ore Geol. Rev.* 1999. Vol. 14. P. 83–104. doi: 10.1016/S0169-1368(99)00002-5

Okrusch M., Bunch T. E., Bank H. Paragenesis and petrogenesis of a corundum-bearing marble

at Hunza (Kashmir) // *Mineral. Depos.* 1976. Vol. 11. P. 278–297. doi: 10.1007/BF00203079

Peretti A., Mullis J., Mouawad F. The role of fluoride in the formation of color zoning in rubies from Mong Hsu (Myanmar, Burma) // *J. Gemmol.* 1996. Vol. 25. P. 3–19. doi: 10.15506/JoG.1996.25.1.3

Polat A., Schersten A., Appel P. W. U., Frei R. New age (ca. 2970 Ma), mantle source composition and geodynamic constraints on the Archean Fiskenasset anorthosite complex, SW Greenland // *Chemical Geology*. 2010. Vol. 277(1). P. 1–20.

Principais depositos minerales do Brasil. Vol. IV, pt. A. Brasilia, 1991. (In Portuguese)

Rakotondrazafy A. F. M., Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A. E. Gem corundum deposits of Madagascar: a review // *Ore Geology reviews*. 2008. Vol. 34(1). P. 134–154.

Saul J. M. A geologist speculates: On gemstones, origins of gas and oil, moonlike impact scars on the Earth, the emergence of animals and cancer. 2015. 160 p.

Schwarz D., Pardieu V., Saul J. M., Schmetzer K., Laurs B. M., Giuliani G., Klemm L., Malsy A. K., Hauzenberger C., Du Toit G., Fallick A. E., Ohnenstetter D. Rubies and sapphires from Winza, Central Tanzania // *Gems Gemol.* 2008. Vol. 44. P. 322–347. doi: 10.5741/GEMS.44.4.322

Silva K. K. M. W., Siriwardena C. H. E. R. Geology and the origin of the corundum-bearing skarn at Bakamuna, Sri Lanka // *Mineralium Deposita*. 1988. Vol. 23, iss. 3. P. 186–190.

Simonet C. *Geologie des Gisements de Saphir et de Rubis. L'exemple de la John Saul Mine, Mangari, Kenya*: PhD thesis. Nantes, France, 2000. (In French)

Simonet C., Fritsch E., Lasnier B. A classification of gem corundum deposits aimed towards gem exploration. *Ore Geol. Rev.* 2008. Vol. 34. P. 127–133. doi: 10.1016/j.oregeorev.2007.09.002

Steven P., Youkovich S. Ruby mines of North Carolina // *Rocks and Miner.* 1985. Vol. 60, 2.

Tenthorey E. A., Ryan J. G., Snow E. A. Petrogenesis of sapphirine-bearing metatroctolites from the Buck Creek ultramafic body, southern Appalachians // *J. Metam. Geol.* 1996. Vol. 14. P. 103–114.

Wells A. J. Corundum from Ceylon // *Geol. Magazine*. 1956. Vol. 93, no. 1. P. 25–31.

Поступила в редакцию 27.09.2021

References

Barnov N. G., Mel'nikov E. P., Viktorov V. P. Mineralogiya mestorozhdenii blagorodnykh korundov mira [Mineralogy of noble corundum deposits of the world]. *Otechestvennaya geol.* [National Geol.]. 2016. No. 1. P. 39–45.

Barnov N. G., Mel'nikov E. P. Geneticheskie tipy blagorodnykh korundov [Genetic types of noble corundum]. *Mining Information and Analytical Bull.* 2015. No. 6. P. 79–85.

Bukanov V. V. Tsvetnye kamni i kollektzionnye mineraly [Colored stones and collectible minerals. Encyclopedia]. St. Petersburg: Ottava Book Printing, 2014. 464 p.

Gromov A. V. Rozovyi korund iz Khitoostrovskogo proyavleniya v Severnoi Karelii [Pink corundum from the Khitostrovsky occurrence in North Karelia]. *Mir kamnya* [World of Stones]. 1993. No. 2. P. 1–3.

Mel'nikov E. P., Vasil'ev A. V., Viktorov V. P. Netradiatsionnaya geneticheskaya tipizatsiya mestorozhdenii i svoistva blagorodnykh korundov [Non-traditional genetic typification of deposits and properties of noble corundum]. *Vestnik gemmol.* [Gemol. Bull.]. 2002. No. 2. P. 7–18.

Rossiiskii metallogenicheskii slovar' [Russian metallogenic dictionary]. St. Petersburg: VSEGEI, 2003. 320 p.

- Terekhov E. N., Levitskii V. I. Geologo-strukturnye zakonomernosti razmeshcheniya korundovoi mineralizatsii v severo-zapadnom Belomor'e [Geological and structural regularities of corundum mineralization in the northwestern Belomor'e]. *Izvestiya vusov. Geol. i razvedka* [Proceed. Higher Ed. Inst. Geol. and Exploration]. 1991. No. 6. P. 3–13.
- Balmer W. A., Hauzenberger C. A., Fritz H., Suthirat C. Marble-hosted ruby deposits of the Morogoro region, Tanzania. *J. Afr. Earth. Sci.* 2017. No. 134. P. 626–643. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2017.07.026
- Dzikowski T. J., Cempirek J., Groat L. A., Dipple G. M., Giuliani G. Origin of gem corundum in calcite marble: The Revelstoke occurrence in the Canadian Cordillera of British Columbia. *Lithos.* 2014. P. 198–199, 281–297. doi: 10.1016/j.lithos.2014.03.030
- Fagan A. J. The ruby and pink sapphire deposits of SW Greenland: Geological setting, genesis, and exploration techniques: PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 2018.
- Fanka A., Suthirat C. Petrochemistry, mineral chemistry, and pressure-temperature model of corundum-bearing amphibolite from Montepuez, Mozambique. *Arab. J. Sci. Eng.* 2018. No. 43. P. 3751–3767. doi: 10.1007/s13369-018-3172-8
- Garde A., Marker M. Corundum crystals with blue-red color zoning near Kangerdluarssuk, Sukkertoppen district, West Greenland. *Rep. Gronl. Geol. Unders.* 1988. Vol. 140. P. 46–49.
- Garnier V., Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A. E., Dubessy J., Banks D., Vinh H. Q., Lhomme T., Maluski H., Pêcher A., Bakhsh K. A., Long P. V., Trinh Ph. T., Schwarz D. Marble-hosted ruby deposits from central and Southeast Asia: Towards a new genetic model. *Ore Geol. Rev.* 2008. Vol. 34. P. 169–191. doi: 10.1016/j.oregeorev.2008.03.003
- Giuliani G., Groat L., Fallick A., Pignatelli I., Pardiou V. Ruby deposits: A review and geological classification. *Mineralogy and Geochemistry of Ruby. Minerals.* 2020. Vol. 10(7). Art. 597. doi: 10.3390/min10070597
- Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A. E., Groat L., Fagan J. The geology and genesis of gem corundum deposits. *Geology of Gem Deposits*. Ed. L. A. Groat; Mineralogical Association of Canada: Tucson, AZ, USA, 2014. Short Course Series. Vol. 44. P. 29–112.
- Gübelin E. J. Die Edelsteinvorkommen Pakistans: Rubine aus dem Hunzatal. *Lapis.* 1982. Vol. 7, no. 5. P. 19–31. (In German)
- Hintze J. Safari ndjema – Afrikanisches Tagebuch (II): Rubin in Zoisit – ein Klassiker aus Longido in Tansania. *Lapis.* 2010. Vol. 35(12). P. 15–19. (In German).
- Iyer L. A. N. The geology and gemstones of the Mogok stone tract, Burma. *Memoirs of the Geology Survey of India.* 1953. Vol. 82. P. 7–100.
- Jons N., Schenk V. Relics of the Mozambique Ocean in the central East African Orogen: Evidence from the Vohibory Block of Southern Madagascar. *J. Metam. Geol.* 2008. Vol. 26. P. 17–28. doi: 10.1111/j.1525-1314.2007.00745.x
- Kanis J., Harding R. R. Gemstone prospects in central Nigeria. *J. Gemmol.* 1990. Vol. 22, no. 4. P. 195–202.
- Keulen N., Thomsen T. B., Schumacher J. C., Poulsen M. D., Kalvig P., Vennemann T., Salimi R. Formation, origin and geographic typing of corundum (ruby and pink sapphire) from the Fiskenasset complex, Greenland. *Lithos.* 2020. Vol. 366–367. Art. 105536. doi: 10.1016/j.lithos.2020.105536
- Key R. M., Ochieng J. O. The growth of rubies in south-east Kenya. *J. Gemmol.* 1991. Vol. 22. P. 484–496.
- Kiefert L., Schmetzer K. Blue and yellow sapphire from Kaduna Province, Nigeria. *J. Gemmol.* 1987. Vol. 20, no. 7/8. P. 427–442.
- Kröner A. Late Precambrian plate tectonics and orogeny: a need to redefine the term Pan-African. *Klerkx J., Michot J. (eds). African geology. Musée Royal L'Afrique Centrale. Tervuren, Belgium, 1984. P. 23–28.*
- Le Goff E., Deschamps Y., Guerrot C. Tectonic implications of new single zircon Pb-Pb evaporation data in the Lossogonoi and Longido ruby-districts, Mozambican metamorphic Belt of north-eastern Tanzania. *Comptes Rendus Geosci.* 2010. Vol. 342. P. 36–45. doi: 10.1016/j.crte.2009.10.003
- Mercier A., Debat P., Saul J. M. Exotic origin of the ruby deposits of the Mangari area in SE Kenya. *Ore Geol. Rev.* 1999. Vol. 14. P. 83–104. doi: 10.1016/S0169-1368(99)00002-5
- Okrusch M., Bunch T. E., Bank H. Paragenesis and petrogenesis of a corundum-bearing marble at Hunza (Kashmir). *Mineral. Depos.* 1976. Vol. 11. P. 278–297. doi: 10.1007/BF00203079
- Peretti A., Mullis J., Mouawad F. The role of fluoride in the formation of color zoning in rubies from Mong Hsu (Myanmar, Burma). *J. Gemmol.* 1996. Vol. 25. P. 3–19. doi: 10.15506/JoG. 1996.25.1.3
- Polat A., Schersten A., Appel P. W. U., Frei R. New age (ca. 2970 Ma), mantle source composition and geodynamic constraints on the Archean Fiskenasset anorthosite complex, SW Greenland. *Chemical Geology.* 2010. Vol. 277(1). P. 1–20.
- Principais depositos minerales do Brasil.* Vol. IV, pt. A. Brasilia, 1991. (In Portuguese)
- Rakotondrazafy A. F. M., Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A. E. Gem corundum deposits of Madagascar: a review. *Ore Geol. Rev.* 2008. Vol. 34(1). P. 134–154.
- Saul J. M. A Geologist Speculates: On Gemstones, Origins of Gas and Oil, Moonlike Impact Scars on the Earth, the Emergence of Animals and Cancer. 2015. 160 p.
- Schwarz D., Pardiou V., Saul J. M., Schmetzer K., Laurs B. M., Giuliani G., Klemm L., Malsy A. K., Hauzenberger C., Du Toit G., Fallick A. E., Ohnenstetter D. Rubies and Sapphires from Winza, Central Tanzania. *Gems Gemol.* 2008. Vol. 44. P. 322–347. doi: 10.5741/GEMS.44.4.322
- Silva K. K. M. W., Siriwardena C. H. E. R. Geology and the origin of the corundum-bearing skarn at Bakamuna, Sri Lanka. *Mineralium Deposita.* 1988. Vol. 23, iss. 3. P. 186–190.
- Simonet C. Geologie des Gisements de Saphir et de Rubis. L'exemple de la John Saul Mine, Mangari, Kenya: PhD thesis. Nantes, France, 2000. (In French)
- Simonet C., Fritsch E., Lasnier B. A classification of gem corundum deposits aimed towards gem exploration. *Ore Geol. Rev.* 2008. Vol. 34. P. 127–133. doi: 10.1016/j.oregeorev.2007.09.002

Steven P., Youkovich S. Ruby mines of North Carolina. *Rocks and Miner.* 1985. Vol. 60, 2.

Tenthorey E. A., Ryan J. G., Snow E. A. Petrogenesis of sapphirine-bearing metatroctolites from the Buck Creek ultramafic body, southern Appalachians. *J. Metam. Geol.* 1996. Vol. 14. P. 103–114.

Wells A. J. Corundum from Ceylon. *Geol. Magazine.* 1956. Vol. 93, no. 1. P. 25–31.

Received September 27, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Барнов Николай Григорьевич

доцент, к. г.-м. н.
Горный институт НИТУ «МИСиС»
Ленинский пр., 4, Москва, Россия, 119991
эл. почта: barnov@inbox.ru

Щипцов Владимир Владимирович

заведующий отделом минерального сырья, д. г.-м. н.,
старший научный сотрудник
Институт геологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910

профессор каф. наук о Земле и геотехнологий
Института лесных, горных и строительных наук
Петрозаводский государственный университет
пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: vv.shchiptsov@gmail.com
тел.: +79216240981

CONTRIBUTORS:

Barnov, Nikolai

College of Mining, National University of Science
and Technology (NITU MISIS)
4 Leninskii Ave., 119991 Moscow, Russia
e-mail: barnov@inbox.ru

Shchiptsov, Vladimir

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia

Petrozavodsk State University
33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: vv.shchiptsov@gmail.com
tel.: +79216240981

УДК 553.41 (470.22) + 553.5

ЗОЛОТОРУДНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ НОВЫЕ ПЕСКИ (ЮЖНАЯ КАРЕЛИЯ) – НОВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ ОБЪЕКТ РУДНОГО СЫРЬЯ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**П. В. Фролов¹, В. М. Тытык², В. И. Кевлич¹, Г. А. Микулин²,
А. И. Савицкий¹**

¹ Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

² ООО «Онега-Золото», Петрозаводск, Россия

Дается краткий обзор геологической изученности месторождения Новые Пески (Южная Карелия) с момента выявления золото-сульфо-арсенидного проявления до стадии поисково-оценочных работ. Анализируются результаты работ по пробной эксплуатации опытно-промышленного карьера. Особенности геологического строения месторождения связаны со сложноскладчатой Улялегской структурой мезоархейского Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Фенноскандинавского щита. Данная структура представляет собой изолированный останец пород зеленокаменного пояса, сохранившийся среди более древних гранито-гнейсов, прорывается молодыми гранитами, приурочена к восточной Хаутаваарско-Ведлозерской части зеленокаменного пояса. Золотоносная руда объекта локализована в амфиболитах шотозерской толщи неоархея. В статье золоторудный объект Новые Пески впервые рассматривается как комплексный, перспективы которого, наряду с главным полезным ископаемым – золотом, связаны с попутным использованием вскрышных скальных пород в качестве общераспространенных полезных ископаемых (ОПИ), а также возможным извлечением и других полезных ископаемых. Приведены результаты испытаний вмещающих скальных пород для производства щебня и сделан вывод о его пригодности для строительства дорог.

Ключевые слова: золото; арсенопирит; рудная минерализация; амфиболиты; вскрышные породы.

P. V. Frolov, V. M. Tytyk, V. I. Kevlich, G. A. Mikulin, A. I. Savitsky. NOVYE PESKI GOLD DEPOSIT (SOUTH KARELIA) IS A NEW EXPERIMENTAL COMPOSITE SOURCE SITE OF ORE AND CONSTRUCTION MATERIALS

The paper is a brief overview of the geological study of the Novye Peski deposit (South Karelia) from detection of the gold-sulfarsenide manifestation to the stages of prospecting and evaluation. The results of trial operation of the pilot industrial quarry are analyzed. The features of the geological structure of the deposit are associated with the composite Ulyaleg structure of the Vedlozero-Segozero greenstone belt of the Fennoscandian Shield. This structure is an isolated remnant of the rocks of the greenstone belt, preserved among the older granite-gneisses and young granites that cut through them, in the eastern Hautavaara-Vedlozero band of the greenstone belt. The gold-bearing ore in the site is localized in amphibolites of the Shotozero strata of the Neoproterozoic. This article is the first

to consider the Novye Peski gold ore site as a composite one, which, alongside gold as main mineral, can yield other useful minerals from overburden rock.

Key words: gold; arsenopyrite; ore mineralization; amphibolites; overburden rock.

Введение

В Карелии на протяжении нескольких десятилетий проводится систематическое изучение золотоносности территории, с выделением перспективных на золото минерагенических зон, в которых обнаружены пока только мелкие золоторудные объекты [Минерально-сырьевая..., 2006; Иващенко, Голубев, 2011]. Однако опыт соседней Финляндии показывает, что такие объекты, в том числе с труднообогатимыми рудами, достаточно успешно эксплуатируются благодаря развитой инфраструктуре, отработанным методикам добычи и технологиям обогащения, упорядоченному горному законодательству (по материалам полевых семинаров в рамках приграничного сотрудничества ТАСИС проекта КОССТОУН с участием ИГ КарНЦ РАН).

В данной статье обсуждается опыт пробной эксплуатации одного из таких объектов в Карелии. ООО «Онего-Золото» отрабатывает комплексную методику максимального использования горной массы, добываясь экологически чистой и экономически эффективной эксплуатации месторождения золотоносных руд и строительных материалов. При этом планируется решить проблемы геоэкологии и экономической рентабельности данного объекта, на его примере отработать новые подходы, позволяющие повысить инвестиционную привлекательность горнодобывающей отрасли Республики Карелия.

Для проведения геологических работ на объекте и прилегающих площадях привлекались специалисты из разных организаций – Карельской геологической экспедиции, Института геологии КарНЦ РАН, ООО «Открытая геология» (СПб) и др.

Краткая история геологической изученности

Золото-сульфо-арсенидное проявление Новые Пески (Южная Карелия) выявлено при геологической съемке работами Карельской геологической экспедиции в 1988 г. [Сиваев и др., 1988]. Объект расположен на территории Пряжинского муниципального района Республики Карелия и находится в 75 км к западу от г. Петрозаводска или в 40 км к северо-западу от райцентра г. Пряжа, в 2,5 км к северо-за-

паду от поселка Новые Пески и одноименной ж/д станции. В последующие годы оно изучалось в процессе проведения различных производственных, тематических и научно-исследовательских работ [Кулешевич, Тытык, 2014; Кулешевич и др., 2014; Коршунова, Чарыкова, 2018]. Основное полезное ископаемое – золото (максимальное содержание в пробах руды – до 56,4 г/т), попутное – мышьяк (арсенопирит).

В 2007–2011 гг. ООО «Онего-Золото» проведены поисковые и поисково-оценочные работы в рамках лицензии ПТЗ 13897 БП на поиски и оценку месторождений рудного золота на участке недр «Хаутаваарская площадь». В результате геологоразведочных работ, включающих поисковые маршруты, геофизические, геохимические, горные и буровые работы, опробование, аналитические и камеральные работы, выявлено около 30 золоторудных пересечений. В соответствии с «Классификацией запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых» в 2012 г. месторождение Новые Пески по сложности геологического строения было отнесено к IV группе, а по степени изученности – к группе оцененных. По состоянию на 01.01.2012 г. на месторождении Новые Пески утверждены и поставлены на государственный учет запасы и прогнозные ресурсы в следующем количестве руды и золота: категория C_2 – 230 тыс. т руды (расчетное среднее содержание металла – 4,68 г/т) и 1077 кг золота; категория P_1 – 5,8 т золота; категория P_2 – 5,0 т золота.

На основании отчетных материалов о результатах работ, экспертных заключений СПб филиала ФБУ «ГКЗ» и ФГУП ЦНИГРИ, протоколов утверждения запасов (ТКЗ «Карелнедра») и апробации прогнозных ресурсов (ФГУП ЦНИГРИ) [Ведешкин-Рябов и др., 2011, 2012] Управление по недропользованию по Республике Карелия (Карелнедра) выдало ООО «Онего-Золото» свидетельство ПТЗ 12 МЕТ 00014 от 13.04.2012 г. об установлении факта открытия месторождения рудного золота Новые Пески, что послужило основанием для предоставления ООО «Онего-Золото» лицензии на пользование недрами ПТЗ 01649 БЭ от 04.06.2012 г. с целью разведки и добычи рудного золота на месторождении. Срок действия лицензии – до 10.06.2032 г. В соответствии с лицензией и проектом разведки месторождения работы зарегистрированы в Государственном реестре

работ по геологическому изучению недр. По результатам полевых работ 2012 г. были уточнены временные разведочные кондиции подсчета запасов золота месторождения Новые Пески и по состоянию на 01.01.2013 г. приняты на государственный учет запасы руды и золота для открытого способа разработки: категория C_1 – 358 тыс. т руды и 968 кг золота; категория C_2 – 1487 тыс. т руды и 4176 кг золота.

В 2012–2015 гг. на лицензируемой площади проводились поисковые работы на золото и по вторичным ореолам в пределах Хаутаваарской структуры – литохимическое и шливовое опробование, магнитная съемка. С помощью метода геохимической съемки донной морены выделено две перспективные зоны, выявлена положительная зависимость в распространении Au и элементов Pb, Ag, Sb, Cu, Cd, Bi во вторичных ореолах рассеяния [Вихко, 2013].

С 2018 по 2020 г. осуществлялась пробная эксплуатация опытно-промышленного карьера Новые Пески (в соответствии с проектом ОПР (опытно-промышленная разработка) [Орлов-

ская, Тытык, 2020]. Примерно в 3 км к северо-западу от поселка Новые Пески создана производственная база компании, которая включает лабораторию оперативных аналитических исследований, рабочую пилотную установку для получения рудного концентрата, опытный цех для производства щебня.

Особенности геологического строения месторождения Новые Пески

Месторождение Новые Пески находится в южной части Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Фенноскандинавского щита в пределах сложноскладчатой Улялегской структуры (рис. 1), представляющей собой изолированный останец зеленокаменных пород среди более древних гранито-гнейсов и молодых прорывающих их гранитов в восточной полосе развития Хаутаваарско-Ведлозерской части зеленокаменного пояса [Рыбаков, 1980]. Улялегская структура, включающая площадь месторождения, сложена породами шотозерской

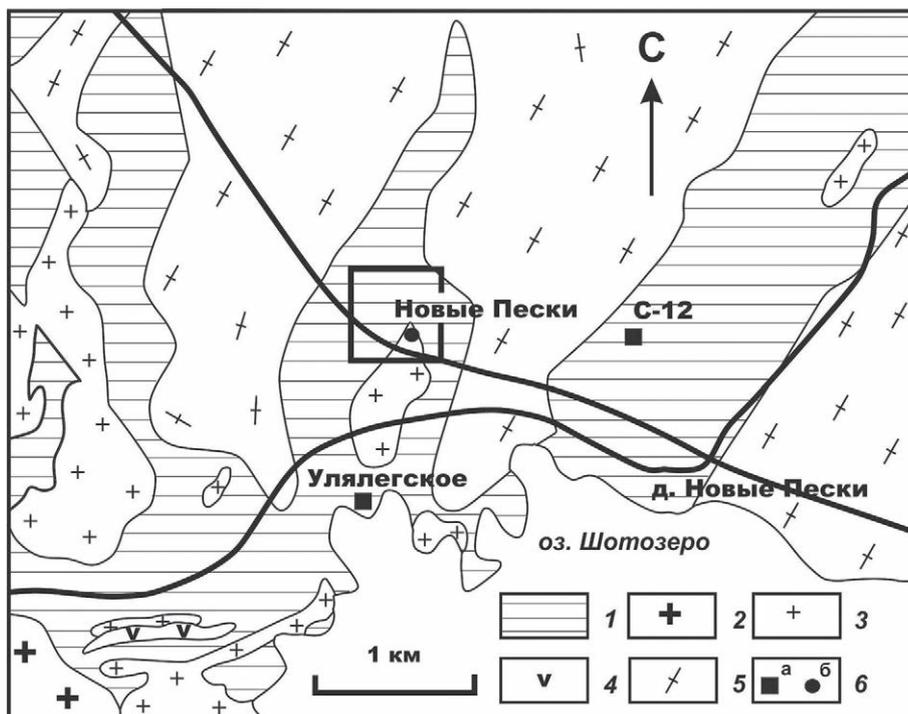


Рис. 1. Схема геологического строения Улялегской структуры (упрощенно, по: [Кулешевич, Тытык, 2014]):

1 – зеленокаменные толщи ($AR_2\text{шт}$ – шотозерская толща); 2 – граниты рапакиви (R_1); 3 – архейские граниты и пегматиты виртаойского комплекса (AR_2v); 4 – габбро-амфиболиты; 5 – гранито-гнейсы (AR_2), 6 – рудопроявления: а – колчеданные, б – золоторудное

Fig. 1. The scheme of the geological structure of the Ulyaleg structure (simplified, according to [Kuleshevich, Tytyk, 2014]):

1 – greenstone strata ($AR_2\text{шт}$ – Shotozero strata); 2 – Rapakivi granites (R_1); 3 – Archean granites, and pegmatites of the Virtaoui complex (AR_2v); 4 – gabbro-amphibolites; 5 – granite-gneiss (AR_2); 6 – ore occurrences: a – pyrite, b – gold ore

толщи, представленными метаморфизованными в условиях эпидот-амфиболитовой – амфиболитовой фаций умеренных давлений осадочно-вулканогенными образованиями мезоархей [Глебовицкий, 1973]. Указанные толщи прорываются позднеархейскими Na-K-гранитами и пегматитами виртаойского комплекса, а также в юго-западной части площади – рифейскими гранитами рапакиви Улягского массива, возраст которых составляет 1,54 млрд лет [Рыбаков, 1980; Сиваев и др., 1988].

Непосредственно в районе опытно-промышленного карьера развиты главным образом измененные габброиды, преобразованные в достаточно однообразные по внешнему облику и однородные по минеральному составу амфиболиты и амфиболовые кристаллосланцы, в которых фрагментарно сохранилась реликтовая габбровая структура [Орловская, Тытык, 2020]. На западном фланге месторождения среди амфиболитовой толщи присутствуют два прослоя плагиогнейсов, диагностируемые в керне скважин и четко выделяемые по данным гамма-каротажа. Они же вскрыты несколькими скважинами и на восточном фланге месторождения. Плагиогнейсы представлены биотитовыми и хлоритовыми, реже амфиболсодержащими разновидностями. Они слагают прослои мощностью от первых метров до 60 м и прослеживаются в субмеридиональном направлении на расстоянии более 0,5 км. Залега-

ние прослоев крутое (80°) с погружением в западных румбах.

К наиболее поздним образованиям на месторождении относятся небольшие тела пегматитов кварц-полевошпатового состава, а также кварцевые, карбонат-кварцевые, эпидот-кварцевые жилы и прожилки. В геологическом строении месторождения эти жильные образования занимают не более 5 % всего объема пород. Пегматиты образуют жильные и дайкообразные тела крутого или пологого залегания мощностью преимущественно от 0,5 до 3 м, иногда достигающие 15–20 м. Жилы кварцевого и карбонат-кварцевого состава обычно маломощные (0,1–1,0 м), и только в единичных случаях отмечаются в керне скважин пересечения мощностью до 2–3 м.

Учитывая особенности минерального и геохимического состава рудовмещающих пород, предполагается, что первоначально они являлись габброидами и базальтами, впоследствии преобразованными в амфиболиты и кристаллосланцы. Оруденение локализовано в метасоматизированных, рассланцованных и катаклазированных породах, представленных ильменит-кварц-гранат-амфиболовыми, ильменит-кварц-гранат-полевошпат-амфиболовыми метасоматитами и титанит-карбонат-биотит-хлорит-эпидотовыми (клиноцоизитовыми) их разновидностями. В главной рудной зоне наиболее богатые содержания золота в рудах коррелируют с породами, обладающими повышенной магнитностью (рис. 2). К осо-



Рис. 2. Южный борт карьера Новые Пески. Главная рудная зона. Субвертикальная зона (субмеридионального простирания) арсенипиритового оруденения (с содержанием Au в руде до 40 г/т и более) мощностью до первых десятков см. Июнь 2020 г. Фото П. В. Фролова

Fig. 2. The southern side of the Novye Peski quarry. The main ore zone. The sub-vertical zone (of the submeridional strike) of arsenopyrite mineralization (with an Au content in ore up to 40 g/t or more). Photo by P. V. Frolov

бенностям минерального состава метасоматитов следует отнести присутствие гранат-карбонатной ассоциации, распределение которой подчинено сланцеватости пород, а также наличие значительного количества (до 10 %) магнетита и/или ильменита в ассоциации с гранатом и амфиболом. Основными особенностями геохимии метасоматитов являются повышенные концентрации As, коррелируемые с повышенными концентрациями Au, а также относительно высокие концентрации тяжелых лантаноидов (Ce) и скандия.

Золоторудная минерализация в метасоматитах контролируется зонами распространения кварцевых и кварц-карбонатных жил и прожилков небольшой мощности. Метасоматиты, кварцевые и кварц-карбонатные жильно-прожилковые образования тесно связаны с тектонической зоной интенсивного рассланцевания, милонитизации, катаклаза, и таким образом вместе они образуют единую рудную зону, в пределах которой сосредоточены все проявления золоторудной минерализации. Простирание рудной зоны субмеридиональное, залегание крутое (80°) с погружением в западном направлении. В центральной части месторождения ее ширина (мощность) на поверхности достигает 200–250 м с постепенным выклиниванием в северном направлении. С диагональными системами трещиноватости могут быть связаны кварцевые жилы, прожилки, линзы, зоны окварцевания, не содержащие золотоносного оруденения (рис. 3). Секущие жилки пегматитов ориентированы в субширотном направлении и являются, вероятно, жильной фазой Улягского гранитного массива (рис. 4). Таким образом, главные рудоносные системы на месторождении связаны с субмеридиональными системами трещиноватости, геоморфологически выраженными уступами (рис. 5).

Опробование в контуре карьера

В контуре карьера производилась выемка рыхлой горной массы для вскрытия скальных коренных пород. Объем извлеченных вскрышных пород составил 42625 м^3 . На защищенном полотно коренных пород выполнено опробование. Секционные бороздовые пробы отбирались на 65 линиях, заложенных вкрест простирания золоторудных сульфидно-кварцевых прожилковых зон. Всего отобрано 1028 бороздовых проб общей протяженностью 565,4 м. Пробирный анализ с последующим определением Au методом атомно-абсорбционной спектрометрии (код методики – Au 4) выполнен для всех 2338 керновых и бороздовых проб. По данной методике нижняя грани-

ца определяемых значений содержания Au составляет 0,01 ppm. Анализ ICP-AES выполнялся методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (окислительное разложение в четырех кислотах с последующим определением 40 основных элементов, код методики – MA/ES). Анализ относится к полуколичественному, предусматривался с целью массового определения попутных и сопутствующих элементов во всех пробах. Этим методом также проанализированы все керновые и бороздовые пробы.

Для отбора крупнообъемных технологических проб 18.09.2018 г. на месторождении произведен первый пробный взрыв для разрыхления коренных скальных пород. На площади взрываемого блока (2097 м^2) по сети $3 \times 3 \text{ м}$



Рис. 3. Безрудные кварцевые линзы и прожилки. Фото П. В. Фролова

Fig. 3. Metal-free quartz lenses and veins. Photo by P. V. Frolov



Рис. 4. Секущие пегматитовые жилки с апофизами. Фото П. В. Фролова
Fig. 4. Cross-cutting pegmatite veins with apophyses. Photo by P. V. Frolov



Рис. 5. Участок Новые Пески, уступы субмеридионального простирания (рудоконтролирующее направление), вид с запада. 24.07.2018 г. Фото П. В. Фролова
Fig. 5. The Novye Peski section, ledges of the submeridional strike (ore-controlling direction), view from the west. 24.07.2018. Photo by P. V. Frolov

было пробурено 203 скважины общим объемом 1939 м при средней глубине 9,55 м. Объем взорванного блока скальных пород составил

19610 м³. При бурении взрывных скважин (шпуров) проводилось опробование извлекаемого шлама. Из шпуров отбирались три шламовые

пробы в интервалах по 3 м. Всего было отобрано 160 шламовых проб из 54 шпуров, равномерно расположенных в пределах взрываемого блока на четырех линиях. Определение содержания золота и попутных компонентов в шламовых пробах также выполнено пробирным и ИСР методами.

Аналитические исследования проводились в лаборатории ООО «Стюарт Геокемикл энд Эс-сей» (Москва).

Полезные ископаемые объекта Новые Пески

Золото

Рудная минерализация представлена несколькими ассоциациями Fe-Ti оксидных и сульфидных минералов. Наиболее ранним является магнетит-ильменитовый парагенезис в составе ильменит-гранат-кварц-амфиболовых метасоматитов, причем ильменит резко преобладает, а магнетит имеет реликтовый облик. Распространение этого рудного парагенезиса подчинено сланцеватости. Впоследствии на этот парагенезис, замещая ильменит, накладывается пирротин-халькопиритовая ассоциация (иногда со сфалеритом). Ее распределение имеет гнездово-полосчатый характер, она приурочена главным образом к ильменитовым гранобластовым агрегатам, развитым согласно общей линейной ориентировке минералов. Пирротин в значительной степени, а иногда и полностью, замещен марказитом, а далее пиритом. Наиболее поздней является пирит-арсенопиритовая ассоциация с золотом. Распределение этой ассоциации вкрапленно-гнездовое и имеет наложенный характер как на более ранние магнетит-ильменитовую и пирротин-халькопиритовую минерализации (локализуясь по «полосам» их развития), так и на силикатную часть породы. Золото представлено в трех основных позициях: 1) в виде мелких (первые микроны) включений в арсенопирите; 2) в виде более крупных (10–25 мкм) выделений, приуроченных к трещинкам катаклаза арсенопирита; 3) в виде свободных выделений в силикатной матрице породы, причем присутствуют как мелкие обособления, так и крупные (более 100 мкм) золотины. Золото является высокопробным (810–930), в крупных выделениях иногда содержит примесь меди (до 1%). Крупные золотины более высокопробные. Среднее содержание Ag – 7%. Содержание золота в сульфидизированных метасоматитах колеблется от 0,02 до десятков граммов на тонну [Кулешевич и др., 2014; Кулешевич, Тытык, 2014; Орловская, Тытык, 2020].

Ранее авторами были отобраны представительные пробы из канавы № 8 – рудной зоны и рыхлых отложений над ней (проба № 8/11203 – из коренных пород, № 8/2016 – из рыхлых отложений). Проведено минералогическое-технологическое изучение [Кевлич и др., 2016, 2018]. Минералогическое изучение проб проводилось с применением комплекса оптических, минералогических и обогатительных методов исследований для обеспечения технологических работ. Для определения минерального состава, выяснения особенностей распределения, типов сростков в пробе, характера раскрытия золота на предварительно измельченном материале до 0,5 мм, усредненном, классифицированном и фракционированном по плотности и магнитным свойствам, использовали оптическую микроскопию. Минеральный состав проб представлен в табл. 1. Отработана схема обогащения руд (рис. 6). Золото в руде месторождения Новые Пески в основном находится в сростании с арсенопиритом. Золотоносная руда является труднообогатимой. В лабораторных условиях Института геологии КарНЦ РАН разработана технология, включающая комплекс методов обогащения на концентратном столе, магнитную и электрическую сепарацию, что позволило получить концентраты золота [Кевлич и др., 2018]. Полученные при обогащении концентраты арсенопирита в перспективе можно использовать для получения мышьяка. Золото возможно извлекать также из рыхлых отложений (вскрыши) непосредственно над рудной зоной.

Формирование оруденения является полистадийным. В сдвиговых зонах сначала образуются ильменит-гранат-кварц-амфиболовые метасоматиты и формируется халькопирит-пирротинный парагенезис. Позже ильменит замещается сульфидами, и происходит дальнейшая сульфидизация пирротина с образованием пирита. В условиях затухания в сдвиговой зоне деформаций происходит отложение пирит-арсенопиритового парагенезиса, в ходе которого золото укрупняется и высвобождается из сульфидов, переходя в силикатную часть породы. Таким образом, локализация Au-S-As-оруденения в зоне ССВ-деформации (шир-зоне), характер окolorудных изменений, ассоциация арсенопирита с леллингитом и сульфидами (пирит, пирротин) позволяют отнести рудопроявление Новые Пески к гипо-мезотермальному золото-арсенопиритовому типу (T = 500–350 °C) в породах амфиболитовой фации, сформировавшемся после пика метаморфизма на позднеархейской коллизионной стадии развития территории [Кулешевич и др.,

Таблица 1. Результаты минералогического анализа проб К-8/11203, К-8/2016 объекта Новые Пески

Table 1. Results of mineralogical analysis of samples K-8/11203, K-8/2016 of the Novye Peski object

Минерал Mineral	Номер пробы Sample number		Выход тяжелой фракции, % Heavy residue output, %	
	К-8/11203	К-8/2016	К-8/11203	К-8/2016
Арсенопирит Arsenopyrite	15,96	5,27	Коренные породы Primary rocks 22,18	Рыхлые отложения Loose sediments 12,64
Амфибол Amphibole	37,05	39,82		
Кварц Quartz	24,27	5,77		
Гранат Garnet	3,17	28,1		
Апатит Apatite	1,03	0,67		
Эпидот Epidote	1,53	2,59		
Циркон Zircon	-	0,14		
Сфалерит Sphalerite	-	0,04		
Магнетит Magnetite	6,84	16,6		
Ильменит Ilmenite	0,3	0,2		
Халькопирит Chalcopyrite	0,16	-		
Гидроокислы железа Iron hydroxides	0,77	0,8		
Ед. знаки Occasional	Титанит, кальцит, рутил, шеелит, циркон, пирротин, халькопирит Titanite, calcite, rutile, scheelite, zircon, pyrrhotite, chalcopyrite	Титанит, рутил, пирротин, пирит, хромит, плагиоклаз, турмалин Titanite, rutile, pyrrhotite, pyrite, chromite, plagioclase, tourmaline		

2014; Кулешевич, Тытык, 2014]. Возраст оруденения был определен по арсенопиритовым рудам Sm/Nd-методом и равен 2,6 млрд лет [Иващенко и др., 2018].

Вскрышные породы

Для комплексного освоения месторождения произведено изучение свойств вскрышных скальных пород с целью использования в качестве *строительных материалов*. Использование вскрыши повысит эффективность разработки золоторудного месторождения Новые Пески в целом, а также позволит избежать складирования в отвалы значительных объемов горной массы, что положительно скажется на экологической обстановке в районе месторождения.

Щебень. Породы скальной вскрыши месторождения Новые Пески представлены преимущественно амфиболитами по габбро. Они могут быть использованы в качестве общераспространенных полезных ископаемых (ОПИ)

для производства строительных материалов, в частности щебня.

Вскрышные скальные породы карьера изучены в аккредитованной лаборатории кафедры горного дела ИЛГиСН ПетрГУ (г. Петрозаводск) по ряду параметров: петрографическая и петрохимическая характеристика горных пород, физико-технические свойства и радиоактивность сырья, качественные показатели производства щебня. Испытания физико-механических свойств скальных горных пород выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 30629-99 «Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний» и ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективности естественных радионуклидов» (табл. 2). Исходные горные породы оценены в соответствии с требованиями ГОСТ 31436-2011 «Породы горные скальные для производства щебня. Технические требования и методы испытаний». Испытания физико-механических свойств гор-

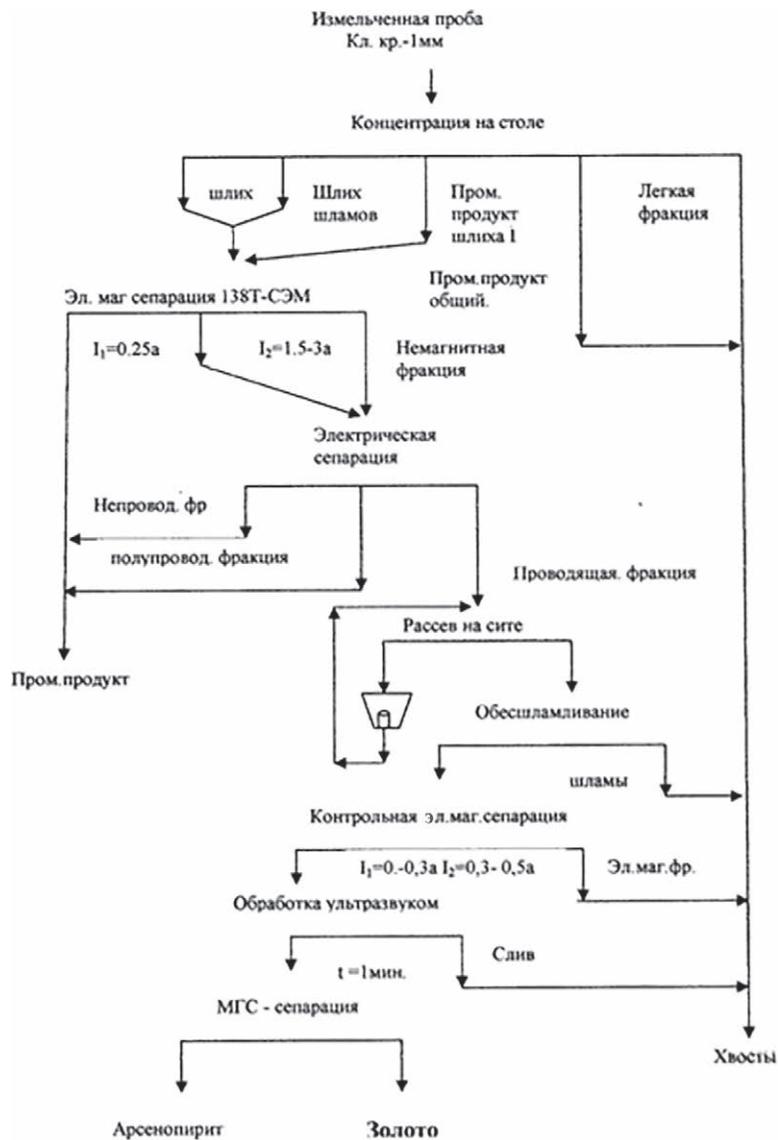


Рис. 6. Схема сепарации золотосодержащих руд месторождения Новые Пески [Кевлич и др., 2018]

Fig. 6. Scheme of separation of gold-bearing ores of the Novye Peski deposit [Kevlich et al., 2018]

ных пород и производимого из них щебня выполнены в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Для определения показателей качества щебня по полному циклу испытаний (фракционный и зерновой состав; содержание пылевидных и глинистых частиц; зерен лещадной формы; зерен слабых пород; дробимость; истираемость; морозостойкость; сопротивление удару на копре; истинная, средняя и насыпная плотность; водопоглощение; пористость; пустотность; устойчивость структуры против распадов; удельная электропроводность) были предоставлены пробы амфиболитов (1-П/12), кристаллослан-

цев (2-П/12) и плагиогнейсов (4-П/12) массой 120 кг каждая. Предел прочности при сжатии определялся по образцам-цилиндрам, также и средняя плотность горных пород определена на образцах-цилиндрах диаметром и высотой по 4,7 см. Истинная плотность горных пород определена путем измерения массы единицы объема измельченного высушенного материала крупностью $-0,125$ мм с использованием прибора Ле Шателье. Пробы для определения истинной плотности приготовлены путем измельчения и истирания остаточного материала после определения предела прочности на сжатие. За результат принималось сред-

Таблица 2. Физико-механические свойства скальных вскрышных пород

Table 2. Physical and mechanical properties of overburden rock

№ п/п No.	Показатели Index	Проба 1-П/12 (амфиболиты) Sample 1-П/12 (amphibolites)			Проба 2-П/12 (кристаллосланцы) Sample 2-П/12 (crystal schists)			Проба 4-П/12 (плаггиогнейсы) Sample 4-П/12 (plagiogneisses)		
		Фракция, мм Fraction, mm								
		5–10	10–20	20–40	5–10	10–20	20–40	5–10	10–20	20–40
1	Истинная плотность, г/см ³ True density, g/cm ³	3,10			3,03			2,70		
2	Средняя плотность, г/см ³ Average density, g/cm ³	3,00	2,98	3,03	2,99	2,97	3,00	2,63	2,64	2,697
3	Насыпная плотность, г/см ³ Bulk density, g/cm ³	1,423	1,415	1,4	1,426	1,408	1,417	1,243	1,4	1,33
4	Водопоглощение, % Water absorption,%	0,36	1,20	0,90	0,52	0,28	0,21	0,58	0,23	0,12
5	Пористость, % Porosity,%	3,3	3,9	2,1	1,3	2,0	1,0	2,5	2,2	1,94
6	Пустотность, % Emptiness,%	52,6	52,5	53,8	52,3	52,6	52,8	52,7	47,0	49,8
7	Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, % Content of lamellar and needle-shaped grains,%	31,5	27,5	17,3	54,9	41,8	41,9	66,5	62,2	54,3
8	Содержание зерен слабых пород в щебне, % Content of grains of poor rocks in crushed stone,%	нет по	нет по	нет по	нет по	нет по	нет по	3,2	2,1	1,8
9	Содержание пылевидных и глинистых частиц, % Content of dust and clay particles,%	0,2	0,09	0,06	0,1	0,04	0,03	0,2	0,08	0,1
10	Марка щебня по прочности Потеря массы, % Crushed stone grade by strength Weight loss,%	<u>1400</u> 10,4	<u>1400</u> 8,1	<u>1400</u> 10,0	<u>1400</u> 8,2	<u>1400</u> 6,3	<u>1400</u> 7,4	<u>1400</u> 8,5	<u>1400</u> 7,8	<u>1400</u> 8,1
11	Марка по истираемости Потеря массы, % Abrasion grade Weight loss,%	И1 19,4	И1 15,2	И1 17,7	И1 15,3	И1 12,4	И1 14,8	И1 14,7	И1 14,4	И1 12,9
12	Марка по морозостойкости Frost resistance grade	F100	F150	F150	F300	F200	F200	F50	F150	F50
13	Марка по сопротивлению удару Показатель Impact resistance mark Index	<u>У75</u> 260,4			<u>У75</u> 234,7			<u>У75</u> 250,0		
14	Удельная электропроводность, Ом/м ^(мин.-макс.) _{средняя} Specific electrical conductivity, ohm/m ^(min.-max.) _{average}	<u>0,0230–0,0244</u> 0,0234			<u>0,0247–0,0256</u> 0,0250			<u>0,0201–2,0217</u> 0,0209		
15	Устойчивость структуры против распада, % Structural stability against decay,%	0,61	1,01	0,4	0,37	0,06	0,1	3,72	1,47	2,26

Примечание. Данные лаборатории кафедры горного дела ИЛГиСН ПетрГУ.

Note. Data from the laboratory of the Mining Department, Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences of PetrSU.

нее значение по двум параллельным опытам. Определение удельной активности ЕРН выполнено гамма-спектрометрическим методом

на гамма-спектрометре СКС-99 «Спутник». Измерения и расчет аналитических параметров выполнены в соответствии с ГОСТ 30108-94.

В породах скальной вскрыши отсутствуют следы выветривания и вторичных изменений, зоны дробления, прослой глинистых пород. Радиационно-гигиеническая характеристика горных пород основана на измерениях удельной эффективной активности естественных радионуклидов (радия – 226, тория – 232, калия – 40). Определение удельной активности ЕРН выполнено гамма-спектрометрическим методом на гамма-спектрометре СКС-99 «Спутник». Измерения и расчет аналитических параметров проведены в соответствии с ГОСТ 30108-94.

Таким образом, почти все вскрышные скальные горные породы по физико-механическим свойствам подходят под требования ГОСТ, за исключением плагиогнейсов. Их основные свойства: истинная плотность $3,10 \text{ г/см}^3$ – проба 1-П/12 (амфиболиты); $3,03 \text{ г/см}^3$ – проба 2-П/12 (кристаллосланцы); $2,70 \text{ г/см}^3$ – проба 4-П/12 (плагиогнейсы); средняя плотность: соответствует требованиям ГОСТ; водопоглощение: $0,12\text{--}1,2\%$ – ГОСТом не нормируется; пористость: $1,0\text{--}3,9\%$ – ГОСТом не нормируется; содержание зерен пластинчатой и игольчатой формы: щебень из пробы 1-П/12 (амфи-

болит) по содержанию зерен лещадной формы соответствует группам 3–4; щебень из пробы 2-П/12 (кристаллосланец) – группе 5 (кроме фр. 5–10 мм); щебень из пробы 4-П/12 (плагиогнейс) не соответствует требованиям ГОСТ 8267-93, но по согласованию с потребителем допускается выпуск щебня, содержащего свыше 50 %, но не более 65 % зерен пластинчатой (лещадной) и игольчатой формы.

Блочный камень. После взрывных работ в карьере образовалось значительное количество негабаритных глыб вмещающих пород (рис. 7). Часть глыб имеют размеры, позволяющие получить блоки до 1 м^3 и более. Гранатовые амфиболиты обладают высокими декоративными свойствами, что позволяет использовать их в качестве отделочного камня. Негабариты могут быть рекомендованы для изготовления продукции различного назначения – ритуального камня, дорожных плиток, поребриков и т. п. Однако в настоящее время вопрос получения блочного камня в карьере не рассматривается, так как при добыче основного полезного ископаемого (рудное золото) для разрыхления скальных пород планируется



Рис. 7. Карьер Новые Пески после взрыва. 25.02.2020. Глыбы, негабарит. Фото В. М. Тытыка
Fig. 7. The Novye Peski quarry after the explosion. 25.02.2020. Blocks, oversized. Photo by V. M. Tytyk

применять массовые взрывы, что исключает возможность извлечения кондиционного блочного сырья.

Редкоземельные и редкометалльные пегматиты

Наиболее поздними образованиями на объекте являются пегматиты, образующие мелкие жильные и дайкообразные тела. Заметное количество их фиксируется в южной части участка в канавах в железнодорожной выемке, южнее железной дороги, а также в скважинах. Пегматиты секут все типы пород, в том числе амфиболиты. Скважинами были вскрыты жилы олигоклазовых и микроклиновых пегматитов мощностью 1–5, иногда до 15–30 м. В контуре карьера отмечены маломощные жилки (первые десятки сантиметров, до метра) неправильной формы кварц-альбитовых пегматитов – альбититов (см. рис. 4), по полученным нами предварительным данным, несущие редкометалльную и редкоземельную минерализацию (цирконий, ниобий, гафний, церий и др.). Пегматиты Улялегского рудного поля сосредоточены на небольшой площади между железной дорогой с ж/д станцией Новые Пески и р. Шуйей, впадающей в Шотозеро [Минерально-сырьевая..., 2006]. Альбититы, вскрытые в карьере, представляют, очевидно, метасоматиты жильной фазы улялегских гранитов рапакиви.

Магнезиальное сырье

Расположенная к западу от Улялегской соседняя Хаутаваарская зеленокаменная структура перспективна на магнезиальное сырье – в частности, в пределах лицензируемой ООО «Онего-Золото» площади имеет место проявление тальковых руд Игнайла (Коруд-Ярви) [Фурман, 1995; Фролов, 2003], находящееся в 18 км к северо-западу от месторождения Новые Пески. Проявление расположено в северной части Хаутаваарской структуры Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса. Оно приурочено к висячему боку небольшого субвулканического тела ультраосновных пород, залегающего среди дацитовых и риолитовых порфиритов (рис. 8). Ресурсы тальковых руд составляют 15,2 млн т (P_1).

Таким образом, породные комплексы архейских зеленокаменных поясов, вмещающие золотоносное оруденение, могут включать объекты магнезиального сырья, что расширяет перспективы рудного района.

Заключение

На примере золоторудного месторождения Новые Пески Улялегского рудного поля рассмотрен вариант комплексного использования полезных компонентов при отработке руд. Главное и оцененное полезное ископаемое месторож-

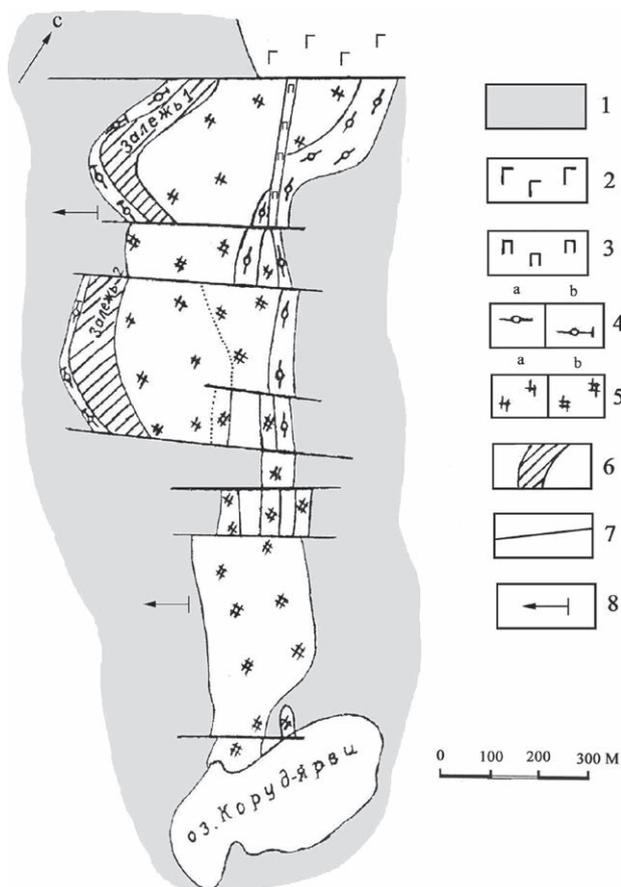


Рис. 8. Схематическое геологическое строение участка проявления тальковых руд Игнайла [по: Фурман, 1995]:

1 – вулканогенные образования каляярвинской свиты (AR_2kl): дацитовые метапорфириты, метадациты, риолитовые порфириты, кварцевые порфиры, сланцы по кислым эффузивам; 2 – габбро; 3 – метапироксениты; 4 – сланцы: хлорит-тремолитовые (а), тальк-хлорит-амфиболовые (b); 5 – серпентиниты апоперидотитовые: антигоритовые, оталькованные и карбонатизированные (а), антигорит-лизардитовые (b); 6 – залежи тальковых руд (в контуре оценки ресурсов P_1); 7 – разломы; 8 – направление падения ультраосновного массива

Fig. 8. Schematic geological structure of the Ignoyala talc ore occurrence site [according to: Furman, 1995]:

1 – volcanogenic formations of the Kalayarva formation (AR_2kl): dacite metaporphyrites, metadacites, rhyolite porphyrites, quartz porphyry, shales by acid effusions; 2 – gabbro; 3 – metapyroxenites; 4 – shales: chlorite-tremolite (a), talc-chlorite-amphibole (b); 5 – apoperidotite serpentinites: antigorite, calcined and carbonated (a), antigorite-lizardite (b); 6 – talc ore deposits (in the resource assessment contour P_1); 7 – faults; 8 – the direction of fall of the ultrabasic massif

дения – золото, попутное – мышьяк (арсенипит). Породы скальной вскрыши месторождения, представленные преимущественно амфиболитами, могут быть использованы в качестве общераспространенных полезных ископаемых (ОПИ) для производства строительных материалов, в частности, для производства щебня, пригодного для строительства дорог. Пегматитовые породы, вскрытые в карьере, потенциально несут редкометалльную и редкоземельную минерализацию. Породные комплексы архейских зеленокаменных поясов, вмещающие золотоносное оруденение, могут быть перспективными и на магнезиальное сырье.

Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР 210 ИГ КарНЦ РАН 121040600173-1.

Литература

Ведешкин-Рябов Д. Г., Ким О. В., Музыка М. И. и др. Геологический отчет, ТЭД, ТЭО, ТЭС / ООО «КМК-РУ». 2012. 251 с. Карельский ТФГИ.

Ведешкин-Рябов Д. Г., Тытык В. М., Ким О. В. и др. Геологический отчет, ТЭД, ТЭО, ТЭС / ООО «КМК-РУ». 2011. 282 с. Карельский ТФГИ.

Вижко А. С. Поиски золота по вторичным литохимическим ореолам рассеивания на перспективных участках Хаутаваарской площади, Карелия // Золото Фенноскандинавского щита: Матер. междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 26–27.

Глебовицкий В. А. Проблемы эволюции метаморфических процессов в подвижных областях. Л.: Наука, 1973. 127 с.

Иващенко В. И., Бушмин С. А., Ручьев А. М., Корнаков А. С., Богомолов Е. С., Савва Е. В., Иванов М. В., Тытык В. М., Фролов П. В. Первое свидетельство архейского возраста орогенного золота в российской части Карельского кратона (Фенноскандинавский щит): минеральная Sm-Nd-изохрона для золоторудных метасоматитов месторождения Новые Пески // ДАН. 2018. Т. 480, № 6. С. 703–708.

Иващенко В. И., Голубев А. И. Золото и платина Карелии: формационно-генетические типы оруденения и перспективы. Петрозаводск, 2011. 369 с.

Кевлич В. И., Тытык В. М., Фролов П. В., Кервинен А. В., Мاستрюкова С. Р. Морфоструктурные характеристики распределения золота при прогнозной минералого-технологической оценке руд месторождения Новые Пески (Южная Карелия) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 18. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. С. 65–70.

Кевлич В. И., Фролов П. В., Тытык В. М., Кервинен А. В., Мастрюкова С. Р. Геолого-минералогическая и технологическая предварительная оценка

и технологическая предварительная оценка золотоносных рыхлых отложений золоторудного месторождения Новые Пески (Южная Карелия) // Роль технологической минералогии в рациональном недропользовании. М.: ВИМС, 2018.

Коршунова В. А., Чарыкова Ч. М. Металлоорганические формы золота и элементов-спутников в подзолистых почвах на территории золотого месторождения Новые Пески (Южная Карелия) // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2018. С. 22–35.

Кулешевич Л. В., Тытык В. М. Метаморфогенно-метасоматические преобразования и Au-S-As минерализация месторождения Новые Пески (Южная Карелия) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 17. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. С. 59–73.

Кулешевич Л. В., Тытык В. М., Компанченко А. А. Au-S-As минерализация месторождения Новые Пески в докембрии Карелии // Руды и металлы. 2014. № 5. С. 37–45.

Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2 / Под ред. В. П. Михайлова, В. Н. Аминова. Петрозаводск: Карелия, 2006. 356 с.

Орловская В. А., Тытык В. М. Дополнение к Технико-экономическому обоснованию временных разведочных кондиций на месторождении рудного золота Новые Пески (по состоянию на 01.01.2013 г.). Технико-экономическое обоснование временных разведочных кондиций и подсчет запасов вскрышных скальных пород месторождения Новые Пески / ООО «Онего-Золото». Петрозаводск, 2020. Карельский ТФГИ.

Рыбаков С. И. Метаморфизм осадочно-вулканогенных формаций раннего докембрия Карелии. Петрозаводск: Карелия, 1980. 135 с.

Сиваев В. В., Горошко А. Ф., Магницкая Т. Э. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые Улягского массива гранитов рапакиви и его обрамления. Отчет о результатах геологической съемки масштаба 1:50 000 и среднемасштабного глубинного геологического картирования, проведенных Ведлозерской партией в 1983–88 гг. в Южной Карелии / КГЭ. Петрозаводск, 1988. Карельский ТФГИ.

Фролов П. В. Тальк Карелии. Размещение проявлений, некоторые особенности геологии и минерации залежей промышленных типов руд // Геолого-технологические исследования промышленных минералов Фенноскандии. Петрозаводск, 2003. С. 38–51.

Фурман В. Н. Отчет о результатах поисков тальковых руд и тальк-хлоритового камня в Республике Карелия в 1990–1994 гг. / КГЭ. Петрозаводск, 1995. Карельский ТФГИ.

Поступила в редакцию 30.09.2021

References

Frolov P. V. Tal'k Karelii. Razmeshchenie proyavlenii, nekotorye osobennosti geologii i mineragenii zalezhei promyshlennykh tipov rud [Karelian talc. Occurrences location, some geological features and minerageny

of industrial types of ores deposits]. *Geologo-tekhnol. issled. industrial'nykh mineralov Fennoskandii* [Geol. and technol. research of industrial minerals in Fennoscandia]. Petrozavodsk, 2003. P. 38–51.

Furman V. N. Otchet o rezul'tatakh poiskov tal'kovykh rud i tal'k-khloritovogo kamnya v Respublike Kareliya v 1990–1994 gg. [Report on the results of prospecting for talc ores and talc-chlorite stone in the Republic of Karelia in 1990–1994]. KGE [KGE]. Petrozavodsk, 1995. Karel'skii TFGI [Karelian Local Fund of Geological Information].

Glebovitskii V. A. Problemy evolyutsii metamorficheskikh protsessov v podviznykh oblastyakh [Problems of the metamorphic processes evolution in mobile regions]. Leningrad: Nauka, 1973. 127 p.

Ivashchenko V. I., Bushmin S. A., Ruch'ev A. M., Kornakov A. S., Bogomolov E. S., Savva E. V., Ivanov M. V., Tytyk V. M., Frolov P. V. Pervoe svidetel'stvo arkhaiskogo vozrasta orogennogo zolota v rossiiskoi chasti Karel'skogo kratona (Fennoskandinavskii shchit): mineral'naya Sm-Nd-izokhrona dlya zolotorudnykh metasomatitov mestorozhdeniya Novye Peski [First evidence of the Archean age of orogenic gold of the Russian part of the Karelian Craton (Fennoscandian Shield): Sm-Nd mineral isochron for gold-bearing metasomatites of the Novye Peski deposit]. DAN [Dokl. Earth Sci.]. 2018. Vol. 480, no. 6. P. 703–708.

Ivashchenko V. I., Golubev A. I. Zoloto i platina Karelii: formatsionno-geneticheskie tipy orudneniya i perspektivy [Gold and platinum in Karelia: formation-genetic types of mineralization and prospects]. Petrozavodsk, 2011. 369 p.

Kevlich V. I., Tytyk V. M., Frolov P. V., Kervinen A. V., Mastryukova S. R. Morfostrukturnye kharakteristiki raspredeleniya zolota pri prognoznoi mineralogo-tekhnologicheskoi otsenke rud mestorozhdeniya Novye Peski (Yuzhnaya Kareliya) [Morphostructural characteristics of gold distribution in the predicted mineralogical and technological assessment of ores of the Novye Peski deposit (South Karelia)]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 18. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2016. P. 65–70.

Kevlich V. I., Frolov P. V., Tytyk V. M., Kervinen A. V., Mastryukova S. R. Geologo-mineralogicheskaya i tekhnologicheskaya predvaritel'naya otsenka zolotonosnykh rykhlykh otlozhenii zolotorudnogo mestorozhdeniya Novye Peski (Yuzhnaya Kareliya) [Preliminary geological, mineralogical and technological assessment of loose gold-bearing deposits of the Novye Peski gold deposit (South Karelia)]. *Rol' tekhnol. mineral. v ratsional'nom nedropol'zovanii* [Role of technol. mineralogy in rational subsoil use]. Moscow: VIMS, 2018.

Korshunova V. A., Charykova Ch. M. Metalloorganicheskie formy zolota i elementov-sputnikov v podzolistykh pochvakh na territorii zolotogo mestorozhdeniya Novye Peski (Yuzhnaya Kareliya) [Organometallic forms of gold and satellite elements in podzolic soils on the territory of the Novye Peski gold deposit (South Karelia)]. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle* [Vestnik St. Petersburg Univ. Earth Sci.]. 2018. P. 22–35.

Kuleshevich L. V., Tytyk V. M. Metamorfogenno-metasomaticheskie preobrazovaniya i Au-S-As mineralizatsiya mestorozhdeniya Novye Peski (Yuzhnaya Kareliya) [Metamorphogenic-metasomatic transformations and Au-S-As mineralization of the Novye Peski deposit (South Karelia)]. *Geol. i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Mineral Resources of Karelia]. Iss. 17. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2014. P. 59–73.

Kuleshevich L. V., Tytyk V. M., Kompanchenko A. A. Au-S-As mineralizatsiya mestorozhdeniya Novye Peski v dokembrii Karelii [Au-S-As mineralization of the Novye Peski deposit in the Precambrian in Karelia]. *Rudy i metally* [Ores and Metals]. 2014. No. 5. P. 37–45.

Mineral'no-syr'evaya baza Respubliki Kareliya [Mineral resources base of the Republic of Karelia]. Vol. 2. Ed. V. P. Mikhailova, V. N. Aminova. Petrozavodsk: Kareliya, 2006. 356 p.

Orlovskaya V. A., Tytyk V. M. Dopolnenie k Tekhniko-ekonomicheskomu obosnovaniyu vremennykh razvedochnykh konditsii na mestorozhdenii rudnogo zolota Novye Peski (po sostoyaniyu na 01.01.2013 g.). Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie vremennykh razvedochnykh konditsii i podschet zapasov vskryshnykh skal'nykh porod mestorozhdeniya Novye Peski [Supplement to the Feasibility study of temporary exploration conditions at the Novye Peski ore gold deposit (as of 01.01.2013). Feasibility study of temporary exploration conditions and calculation of overburden rock reserves of the Novye Peski deposit]. OOO Onego-Zoloto. Petrozavodsk, 2020. Karel'skii TFGI [Karelian Local Fund of Geological Information].

Rybakov S. I. Metamorfizm osadochno-vulkanogennykh formatsii rannego dokembriya Karelii [Metamorphism of sedimentary-volcanogenic formations of the Early Precambrian in Karelia]. Petrozavodsk: Kareliya, 1980. 135 p.

Sivaev V. V., Goroshko A. F., Magnitskaya T. E. et al. Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye Ulyalegskogo massiva granitov rapakivi i ego obramleniya. Otchet o rezul'tatakh geologicheskoi s'emki masshtaba 1:50000 i srednemasshtabnogo glubinnoogo geologicheskogo kartirovaniya, provedennykh Vedlozerskoi partiei v 1983–88 gg. v Yuzhnoi Karelii [Geological structure and minerals of the Ulyaleg massif of rapakivi granites and its framing. The report on the results of geological surveys at a scale of 1: 50,000 and medium-scale deep geological mapping carried out by the Vedlozero crew in 1983–88 in South Karelia]. KGE [KGE]. Petrozavodsk, 1988. Karel'skii TFGI [Karelian Local Fund of Geological Information].

Vedeshkin-Ryabov D. G., Kim O. V., Muzyka M. I. et al. Geologicheskii otchet, TED, TEO, TES [Geological report, feasibility report, PFS, TOS]. OOO KMK-RU. 2012. 251 p. Karel'skii TFGI [Karelian Local Fund of Geological Information].

Vedeshkin-Ryabov D. G., Tytyk V. M., Kim O. V. et al. Geologicheskii otchet, TED, TEO, TES [Geological report, feasibility report, PFS, TOS]. OOO KMK-RU. 2011. 282 p. Karel'skii TFGI [Karelian Local Fund of Geological Information].

Vikhko A. S. Poiski zolota po vtorichnym litokhimicheskim oreolam rasseivaniya na perspektivnykh uchastkakh Khautavaarskoi ploschadi, Kareliya [Prospecting for gold by secondary lithochemical dispersion halos in promising areas of the Hautavaara area, Karelia]. *Zoloto Fennoskandinavskogo shchita: Mater. mezhdunar. konf.* [Gold of the Fennoscandian Shield: Proceed. int. conf.]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. P. 26–27.

Поступила в редакцию 30.09.2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Фролов Петр Владимирович

научный сотрудник
Институт геологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: pv.frolov@yandex.ru
тел.: +79218004150

Тытык Владимир Михайлович

главный геолог
ООО «Онего-Золото»
ул. Фридриха Энгельса, 10, оф. 507, Республика Карелия,
Россия, 185035
эл. почта: tytyk.vladimir@yandex.ru
тел.: +79214651477

Кевлич Владимир Иванович

научный сотрудник, к. т. н.
Институт геологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: tkakevla@mail.ru
тел.: +79114257386

Микулин Глеб Александрович

старший геолог
ООО «Онего-Золото»
ул. Фридриха Энгельса, 10, оф. 507, Республика Карелия,
Россия, 185035
эл. почта: g.mikulin@yandex.ru
тел.: (8142) 594477

Савицкий Александр Ильич

ведущий физик
Институт геологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910

CONTRIBUTORS:

Frolov, Pyotr

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: pv.frolov@yandex.ru
tel.: +79218004150

Tytyk, Vladimir

Onego-Gold LLC
10 Friedrich Engels St., office 507, 185035 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: tytyk.vladimir@yandex.ru
tel.: +79214651477

Kevlich, Vladimir

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: tkakevla@mail.ru
tel.: +79114257386

Mikulin, Gleb

Onego-Gold LLC
10 Friedrich Engels St., office 507, 185035 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: g.mikulin@yandex.ru
tel.: (8142) 594477

Savitskii, Alexander

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia

ХРОНИКА

ШУНГИТЫ – ОТ НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ К ИННОВАЦИЯМ. НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ШУНГИТ-2020–2021» (Петрозаводск, 29 июня – 1 июля 2021 г.)

Летом 2021 г. на базе Института геологии КарНЦ РАН состоялось отложенное в связи с пандемией мероприятие: конференция с международным участием «Шунгитовые породы Карелии: геология, строение, инновационные материалы и технологии «Шунгит-2020–2021». Инициатором и одним из ор-

ганизаторов конференции выступил ИГ КарНЦ РАН, соорганизатор – ООО «Карельская инвестиционная компания «РБК» (Петрозаводск). Конференция проводилась с целью обмена информацией и объединения усилий российских и зарубежных ученых в получении новых знаний о шунгитовых породах Карелии, их геологии,



Секция «Лито- и геохимия шунгитовых пород; минералогия углерода и шунгитовых пород». Докладчик д. г.-м. н. В. В. Ковалевский, председатель секции Ю. Е. Дейнес



Загогинское месторождение, Медвежьегорский район РК. На переднем плане (слева направо): д. г.-м. н. В. В. Ковалевский, руководитель отдела реализации НПК «Карбон-Шунгит» Д. А. Чабанюк, д. г.-м. н. С. А. Светов; на заднем плане – руководитель карьера Загогинского месторождения шунгитовых пород Ю. В. Блюдник



Участники геологической экскурсии. Источник «Царицын ключ», Медвежьегорский район РК

минералогии, строении и свойствах углеродистого вещества. Значительное внимание было уделено прикладным исследованиям и обмену опытом, связанным с добычей, переработкой и использованием шунгитовых пород в наукоемких и инновационных технологиях, проводимых в России и за рубежом.

В программу мероприятия вошли доклады, охватывающие широкий круг научных и производственных интересов. Пленарная сессия включала ретроспективные и обзорные доклады об истории исследований и освоения месторождений шунгитовых пород Карелии. Ряд докладов был посвящен вопросам геологического строения месторождений, лито- и геохимии шунгитовых пород, минералогии углерода и физико-химическим свойствам углеродистого вещества. Серия докладов охватывала научно-технологические аспекты применения шунгитовых пород в крупнотоннажных производствах (металлургия, строительство, сельское хозяйство, шины, резинотехнические изделия, химический комплекс и др.). Особый интерес представили доклады об инновационных материалах на основе шунгитовых пород и технологиях их получения. Конференция продемонстрировала современные достижения в различных областях исследования шунгитовых

пород Карелии, способствовала обмену опытом с целью их более эффективного использования в инновационных направлениях.

В конференции приняли участие российские ученые (из Белгорода, Воронежа, Дубровиц, Москвы, Петрозаводска, Санкт-Петербурга, Сыктывкара, Черноголовки) и их зарубежные коллеги (из Бремена, Германия; Галаццано, Италия; Трондхейма, Норвегия; Сент-Луиса, США; Сент-Эндрюса, Шотландия; Тарту, Эстония).

Для участников конференции была организована геологическая экскурсия на Шунгское, Зажогинское и Максовское месторождения шунгитовых пород. По итогам конференции изданы путеводитель геологической экскурсии и материалы докладов (Шунгитовые породы Карелии: геология, строение, инновационные материалы и технологии «Шунгит-2020–2021»: материалы конференции с международным участием. 29 июня – 1 июля 2021 г., Петрозаводск / отв. за вып. В. В. Ковалевский, Ю. Е. Дейнес. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. 100 с.).

*Ю. Е. Дейнес, А. В. Первунина,
В. В. Ковалевский*

КАРЕЛИЯ – КУРИЛЫ: ДВА КРАЙНИХ РЕГИОНА РОССИИ ОБЪЕДИНИЛА ЭКСПЕДИЦИЯ РГО

В августе–сентябре 2021 года состоялась вторая экспедиция «Восточный бастион – Курильская гряда», поддержанная Русским географическим обществом (РГО). В ее работе удалось принять участие автору этих строк. Цель прошедшего полевого сезона экспедиции – проведение комплексного исследования территории и прилегающей акватории островов Уруп и Чирпой, входящих в состав Курильского архипелага. В экспедиции работали не только ученые самых разных специальностей (ботаники, гидробиологи, орнитологи, почвоведы, географы, геологи, историки, археологи, вул-

канологи), но и краеведы, поисковики, журналисты. Кроме того, в ней принимали участие курсанты военных училищ и военнослужащие. Этот удаленный край стало возможным исследовать таким большим десантом только благодаря поддержке Министерства обороны РФ: его самолеты и корабли работали в интересах экспедиции, его саперы уничтожали боеприпасы времен Второй мировой войны, его повара развешивали полевые кухни.

Территории Карелии и Курил не только находятся в разных частях нашей огромной страны (Курилы, между прочим, расположены



Участники экспедиции РГО в пути



На острове Уруп (автор статьи – справа)

дальше от Карелии, чем заокеанская Северная Америка), но и разительно отличаются своим геологическим строением: Карелия сложена одними из древнейших в мире горными породами, а Курильские острова – самыми молодыми (на о. Чирпой есть минералы, которые формируются прямо на твоих глазах, а последние лавы изливались здесь в 2019 году). Зачем же геолог из Карелии оказался в этой экспедиции? Дело в том, что Курилы – это настоящая геологическая лаборатория, в которой можно наблюдать рождение земной коры, есть шанс

понять, как она формируется. Здесь, по сути, природа проводит на глазах изумленных натуралистов лабораторный опыт, как на уроке химии в школе. Исследуя курильские горные породы, можно научиться лучше понимать происхождение древних карельских пород. В этом и заключалась главная научная задача, которую надо было решать в рамках данных экспедиционных работ.

Безусловно, как и в любом комплексном исследовании, перед учеными разных специальностей стояли и общие задачи: оценка



Остров Уруп, бухта Наталии. На заднем плане справа вулкан Трезубец



Вулканические поля острова Чирпой

уникальности территории. Так, геологам необходимо было собрать материалы для оценки значимости геологических объектов исследуемых островов для науки. Так что нам было легко сочетать узкий научный интерес с интересами экспедиции в целом.

Работая в системе Российской академии наук, привыкаешь к тому, что вокруг тебя проводят исследования такие же, как и ты, энтузиасты, влюбленные в свое дело. Но попадая в такую экспедицию, как «Восточный бастион – Курильская гряда», понимаешь, что в нашем научном сообществе много не просто энтузиастов, а настоящих сподвижников, готовых быстро собрать рюкзак и отправиться в любую точку планеты, невзирая ни на какие сложности. А сложностей на Курилах значительно больше, чем может показаться. И это не только их удаленность, отсутствие регулярной транспортной доступности, необитаемость. По острову Уруп крайне сложно перемещаться без вертолета, ведь склоны его гор покрыты труднопроходимыми зарослями бамбука, трав и стланика, а в океан и море он обрывается высоченными крутыми уступами. Остров Чирпой – это вообще

остров-вулкан с покатыми сыпучими склонами, на которых местами вырываются на поверхность струи горячего пара и кристаллизуется сера. Не менее причудливы и застывшие здесь лавовые потоки, формирующие ландшафт, больше похожий на марсианский. При отсутствии навыков и специального снаряжения передвигаться по такой местности удастся с большим трудом. Но в экспедиции не было ни одного человека, который бы каждый день не ходил в маршруты и не приносил с собой в лагерь образцы горных пород или почв, растений для гербария или артефактов времен войны. Самый крупный образец, привезенный экспедицией, – это череп кашалота весом около тонны – будущий экспонат Зоологического музея.

Коллекция горных пород с Курильских островов уютно расположилась рядом с карельскими гнейсами и эклогитами в хранилище Института геологии КарНЦ РАН, и есть уверенность, что она поможет лучше разобраться с геодинамикой ранней Земли, а значит, и успешнее искать полезные ископаемые.

А. И. Слабунов

ИСТОРИЯ КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН: ЛЮДИ И СОБЫТИЯ

АЛЕКСЕЙ ИВАНОВИЧ БОГАЧЕВ (1921–1999)

Алексей Иванович Богачев родился 3 февраля 1921 г. в Новгородской области. Его школьные годы начались в городе Щербакове (ныне Рыбинск), затем родители переехали в город Новгород (ныне Великий Новгород). В 1938 году он поступил на геологический факультет Ленинградского госуниверситета. Учеба продолжилась в МГУ, размещавшемся в тот военный период в Ашхабаде, но в 1942 году Алексей Иванович был призван на службу в армию и зачислен курсантом Академии химической защиты им. К. Ворошилова. С июля 1943 г. до окончания Великой Отечественной войны воевал на Ленинградском и Белорусском фронтах. Его боевые награды – орден Красной Звезды, медали «За оборону Ленинграда», «За взятие Берлина», «За победу над Германией 1941–1945». Служба в Красной Армии закончилась только в 1947 году в должности командира химической службы воинской части зенитного артиллерийского полка.

Мечта стать геологом не оставила Алексея Ивановича. После демобилизации он поступил на IV курс Ленинградского госуниверситета и в 1949 году завершил обучение. После окончания высшего учебного заведения был направлен на работу в Северо-Западное геологическое управление на должность старшего геолога, а с 1953 года работал отраслевым инженером по цветным и редким металлам. Чаша весов склонилась к выбору научно-тематической работы, поэтому в июне 1954 года



А. И. Богачев поступает в аспирантуру с отрывом от производства. Его научным руководителем назначается профессор П. А. Борисов.



Капитан А. И. Богачев до демобилизации, 1946 г.

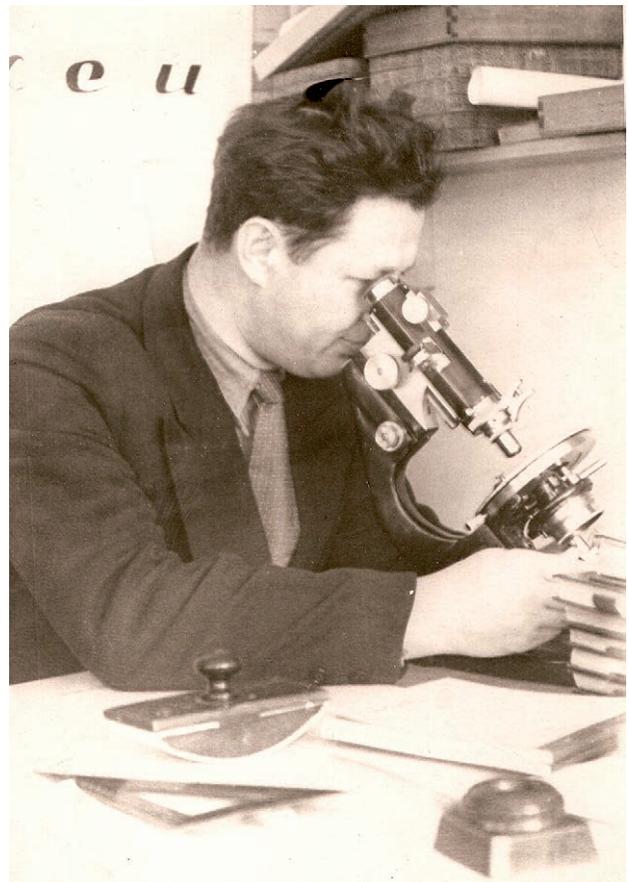
В период 1954–1959 гг. основным объектом исследований был Ельтьозерский массив. В 1961 году на диссертационном совете Ленинградского университета А. И. Богачев защитил кандидатскую диссертацию на тему «Дифференцированные габброиды Ельтьозерского массива».

Некоторое время Алексей Иванович работал старшим геологом Аллареченской партии Печенгской экспедиции СЗГУ, а с 1 марта 1961 г. был переведен на постоянную работу в Карельский филиал АН СССР в отдел региональной геологии на должность младшего научного сотрудника. 18 мая 1961 г. выходит приказ по КФ АН СССР, в котором говорится, что во исполнение Постановления Президиума АН СССР и Приказа по КФ АН СССР на базе существующих в филиале отдела петрографии и минералогии и отдела региональной геологии с их подразделениями организуется Институт геологии. Таким образом, Алексей Иванович становится одним из первых сотрудников института и уже в 1962 году назначается на должность заведующего отделом минералогии и петрографии. В 1964 году он избран на должность

старшего научного сотрудника. Одновременно утвержден научным руководителем аспирантской работы М. М. Лаврова.

С 1966 года А. И. Богачев, продолжая научную деятельность, назначается на должность заместителя директора института по научной работе, а в апреле 1968 года президент АН СССР М. В. Келдыш подписал указ об утверждении Богачева в должности заместителя председателя Президиума Карельского научного центра по научной работе.

К этому времени Алексей Иванович становится ведущим сотрудником в области петрографии и петрологии горных пород. Его научные интересы охватывают проблемы магматизма, металлогении и полезных ископаемых Карело-Кольского региона. Из научных трудов того периода надо отметить издание коллективной монографии «Геология и петрология Ельтьозерского габброидного массива Карелии (геология, петрография, петрология и металлогения)» (М.-Л.: изд-во АН СССР (Ленинградское отделение), 1963. 160 с. Соавторы С. И. Зак, Г. П. Сафронова, К. А. Инина). В 1967 году победителем в конкурсе КФ АН СССР «Лучшая научная работа в честь 50-летия образования СССР»



За работой, 1965 г.



Сотрудники Института геологии – выпускники ЛГУ разных лет, 1976 г. Слева направо: первый ряд – Щипцова Н. И., Лебедева Г. А., Афанасьева Е. М., Король Н. Е., второй ряд – Сафронова Г. П., Богачев А. И., Инина К. А., Бискэ Н. С., третий ряд – Горбик Н. А., Свириденко Л. П., Кузенко Т. И., Кожевников В. Н., четвертый ряд – Крохин А. И., Голубев А. И., Уткин Ю. С.

была признана коллективная монография «Геохимия гипербазитов Карело-Кольского региона» (Л.: Наука, 1971. 140 с. Отв. ред. А. И. Богачев, авторы А. И. Богачев, Н. А. Горбик, М. М. Лавров, М. Г. Попов, В. Д. Слюсарев, В. С. Степанов). В 1968 г. вышел в свет первый выпуск Трудов Института геологии «Вулканогенные и гипербазитовые комплексы протерозоя Карелии» (науч. ред. А. И. Богачев). Творческие заслуги Алексея Ивановича были оценены – в 1970 году ему присвоено звание заслуженного деятеля науки КАССР.

В 1977 г. А. И. Богачев избран по конкурсу на должность заведующего лабораторией минералогии, геохимии и металлогении, которая с 1978 г. в структуре института стала существовать как лаборатория металлогении. В 1970–80-е годы он был председателем координационного совета по геологии и полезным ископаемым Республики Карелия. Большой вклад внес в составление программы совместных исследований ПГО СЗТГУ и Института геологии

КФ АН СССР «Принципы выделения рудоносных структур Карелии и методы локального прогнозирования». В этом отношении Алексей Иванович входил в плеяду тех ученых страны, которые всегда ратовали за тесное сотрудничество науки и производства. В эти же годы выполнялись исследования под его руководством по заданию ГКНТ СССР. Опубликовано более 60 научных работ, в т. ч. две монографии.

В 1986 году Алексей Иванович был освобожден по личной просьбе от обязанностей заведующего лабораторией металлогении. Его научная деятельность продолжалась в должности старшего научного сотрудника. В 1999 году его не стало.

В нашей памяти сохраняется образ Алексея Ивановича Богачева как талантливого учено-геолога, наставника молодежи, доброжелательного человека, оставившего значительный след в истории института.

В. В. Щипцов

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 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 TIFF (*.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 брюхоногого 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). 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. Шерудило¹, М. И. Сысоева¹, Г. Н. Алексейчук², Е. Ф. Марковская¹

¹Институт биологии Карельского научного центра РАН

²Институт 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 ² Chloroplast cross-sectional area, μm ²	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм ² Mitochondria cross-sectional area, μm ²	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм ² Peroxisome cross-sectional area, μm ²	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. Gidrogeokhimicheskie 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, 2021

“PRECAMBRIAN GEOLOGY”

TABLE OF CONTENTS

A. L. Kulakovskiy. HORIZONTAL DIKES IN A CRYSTALLINE BASEMENT: SHIELDING EFFECT OF THE BASEMENT-COVER CONTACT	5
S. Nirgi, A. Soesoo. GEOLOGY AND GEOCHEMISTRY OF A PALEOPROTEROZOIC IRON MINERALIZATION IN NORTH-EASTERN ESTONIA	25
V. V. Shchiptsov, O. B. Kotova, E. G. Ozhogina, B. I. Pirogov. TECHNOLOGICAL MINERALOGY COMPREHENSIVELY	44
T. A. Chikisheva, K. K. Emelyanova, S. A. Prokopiev, E. S. Prokopiev, N. Yu. Turetskaya, I. A. Kalinkin, S. A. Napolskikh. MINERALOGICAL SUPPORT TO THE PROCESS OF OBTAINING HIGH-GRADE IRON ORE CONCENTRATE AT STOILENSKY PROCESSING PLANT.....	67
N. G. Barnov, V. V. Shchiptsov. A SUMMARY OVERVIEW OF DEPOSITS AND LARGE OCCURENCES OF NOBLE PRECAMBRIAN CORUNDUM IN THE WORLD	78
P. V. Frolov, V. M. Tytyk, V. I. Kevlich, G. A. Mikulin, <u>A. I. Savitsky</u> . NOWYE PESKI GOLD DEPOSIT (SOUTH KARELIA) IS A NEW EXPERIMENTAL COMPOSITE SOURCE SITE OF ORE AND CONSTRUCTION MATERIALS	88
CHRONICLE	
Yu. E. Deines, A. V. Pervunina, V. V. Kovalevsky. Shungites – from knowledge to innovation. Scientific conference "Shungite-2020–2021" (Petrozavodsk, June 29 – July 1, 2021).	103
A. I. Slabunov. Karelia – Kuriles: two Russia's two geographic extremes joined together by an expedition of the Russian Geographical Society.	106
HISTORY OF THE KARELIAN RESEARCH CENTRE RAS: PEOPLE AND EVENTS	
V. V. Shchiptsov. Aleksei I. Bogachev (1921–1999).....	109
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS	112

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 10, 2021

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 22.10.2021. Дата выхода 29.10.2021. Формат 60x84^{1/8}.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 12,7. Усл. печ. л. 13,9.
Тираж 100 экз. Заказ 682. 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