

Российская Академия Наук

ВЕСТНИК

Кольского научного центра РАН

1/2017



- НАУКИ О ЗЕМЛЕ
- БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ
- КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ
- КНИГОИЗДАНИЕ
- ЮБИЛЯРЫ
- AD MEMORIAM

1/2017 (9)

издается с декабря 2009 года
ISSN 2307-5228

Российская Академия Наук

ВЕЕСТНИК

Кольского научного центра РАН

Учредитель — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Кольский научный центр РАН

Главный редактор — д. г.-м. н., проф.
Ю. Л. Войтеховский
Заместители главного редактора:
д. г.-м. н., проф. В. П. Петров,
д. т. н., проф. А. Я. Фридман
(руководитель редакции)

Редационный совет:
академик РАН, проф. Г. Г. Матишов,
академик РАН, проф. Н. Н. Мельников,
чл.-корр. РАН, проф. В. К. Жиров,
чл.-корр. РАН, проф. А. И. Николаев,
д. т. н., проф. Б. В. Ефимов,
д. э. н., проф. Ф. Д. Ларичкин,
д. т. н. В. А. Маслобоев,
д. т. н., проф. В. А. Путилов,
д. ф.-м. н. Е. Д. Терещенко,
к. г.-м. н. А. Н. Виноградов (отв. секретарь)

Ответственность за суждения и оценки, выраженные в публикуемых статьях, как и за точность и надежность приводимых сведений лежит исключительно на авторах; публикация статей не является свидетельством того, что издатель — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Кольский научный центр РАН — разделяет мнение их авторов.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) с 2009 г.

Научное издание

Редакторы: А. С. Менделева, С. А. Шарам
Технический редактор: В. Ю. Жиганов

Подписано к печати 31.03.2017. Формат бумаги 60×84 1/8.
Усл. печ. л. 18,4. Заказ № 9. Тираж 500 экз.
ФГБУН КНЦ РАН
184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Грошев Н. Ю., Борисенко Е. С., Савченко Е. Э.

Состав плагиоклаза в разрезе главного анортозитового пласта Западно-Панского платиноносного массива (Кольский полуостров, Россия): первые данные 5

Евзеров В. Я.

Эволюция климата с позиций новой гипотезы образования Земли 16

Евзеров В. Я., Николаева С. Б., Шелехова Т. С.

Рыхлый покров и новейшая геодинамика Кольского залива (первые результаты и перспективы дальнейших работ) 24

Ильченко В. Л.

Квантование лунной гравитации (энергии приливной волны) в земной оболочке и «квантовая» основа силы упругости 34

Морозова Л. Н., Баянова Т. Б., Базай А. В., Лялина Л. М., Серов П. А., Борисенко Е. С., Кунаккузин Е. Л.

Редкометалльные пегматиты Колмозерского литиевого месторождения Арктического региона Балтийского щита: новые геохронологические данные 43

Субботин В. В., Габов Д. А., Корчагин А. У., Савченко Е. Э.

Золото и серебро в составе платинометаллических руд Федорово-Панского интрузивного расслоенного комплекса 53

Мельников Н. Н., Гусак С. А., Наумов В. А.

Использование атомных станций малой мощности для энергоснабжения арктических месторождений твердых полезных ископаемых 66

Абрамов Н. Н., Епимахов Ю. А., Кабеев Е. В.

Методическое обеспечение геомониторинга устойчивости скальных откосов 78

Ловчиков А. В., Савченко С. Н.

Оценка возможности частичной выемки целиков на руднике «Карнасурт» 85

Смирнов Ю. Г., Орлов А. О.

Многobarьерная система безопасности при строительстве и эксплуатации подземных атомных станций малой мощности в условиях Российской Арктики 93

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Маслобоев В. А., Вигдергауз В. Е., Макаров Д. В., Светлов А. В., Некипелов Д. А., Селезнев С. Г.

Методы снижения концентрации сульфатов в сточных водах горнорудных предприятий 99

Сулименко Л. П., Кошкина Л. Б., Маслобоев В. А.

Практические аспекты использования сорбентов для санации локальных нефтезагрязненных северных территорий 116

Калюжный И. Л.

Формирование глубин промерзания болот Кольского полуострова 124

ЖИЗНЬ НАУКИ. КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ 139

КНИГОИЗДАНИЕ 143

ЮБИЛЯРЫ 146

AD MEMORIAM 156

Требования к оформлению статей см.:

<http://www.kolasc.net.ru/russian/news/vestnik/trebovaniya.pdf>

Редколлегия:

д. б. н. Н. К. Белишева, к. т. н. П. Б. Громов, д. ф.-м. н. В. Е. Иванов, д. б. н. Н. А. Кашулин, д. т. н. А. А. Козырев, д. б. н. П. Р. Макаревич, д. т. н. А. Г. Олейник, д. и. н. И. А. Разумова, к. г.-м. н. Т. В. Рундквист, д. э. н. В. С. Селин, к. т. н. А. Ф. Усов (отв. секретарь, д. т. н. А. Я. Фридман (руководитель редакции)

1/2017 (9)

Published since December 2009

ISSN 2307-5228

Russian Academy of Sciences

HERALD

of the Kola Science Centre of the RAS

Publisher — Federal State Budgetary Institution
of Science Kola Science Centre of the RAS

Editor-in-Chief — Y. L. Voytekhovskiy,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Prof.;
Vice Editors-in-Chief:
V. P. Petrov, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Prof.;
A. Ya. Fridman, Dr. Sci. (Eng.), Prof.
(Head of Editorial Staff)

Editorial Board:
G. G. Matishov, Academician of the RAS, Prof.
N. N. Mel'nikov, Academician of the RAS, Prof.
V. K. Zhironov, Corr. Member of the RAS, Prof.
A. I. Nikolaev, Corr. Member of the RAS, Prof.
B. V. Efimov, Dr. Sci. (Eng.), Prof.
F. D. Larichkin, Dr. Sci. (Econ.), Prof.
V. A. Masloboev, Dr. Sci. (Eng.)
V. A. Putilov, Dr. Sci. (Eng.), Prof.
E. D. Tereshchenko, Dr. Sci. (Phys. & Math.)
A. N. Vinogradov, PhD (Geol. & Mineral.)
Responsible Secretary

The responsibility for opinions, expressed in the signed articles, studies and other contributions rests solely with the authors, and publication does not constitute any endorsement of the Federal State Institution of Science Kola of Science Centre of the RAS for the opinions, expressed in them.

The journal has been included in the Russian Science Citation Index (RISC) since 2009

CONTENTS

EARTH SCIENCES

- Nikolay Yu. Groshev, Elena S. Borisenko, Yevgene E. Savchenko*
The First Data on Plagioclase Compositions in the Section of the Main Anorthosite Layer
of the West-Pana PGE-Bearing Intrusion (Kola Peninsula, Russia)..... 5
- Vladimir Ya. Yevzerov*
Evolution of Climate from the Standpoint of a New Hypothesis of the Earth Formation..... 16
- Vladimir Ya. Yevzerov, S. B. Nikolaeva, Tatyana S. Shelekhova*
Loose Cover and Newest Geodynamics of the Kola Bay (First Results
and Prospects for Further Researches)..... 24
- Vadim L. Il'chenko*
Quantization Lunar Gravity (Tidal Waves Energy) in Earthly Shell
and "Quantum" Basis of Elastic Force 34
- Morozova Lyudmila N., Bayanova Tamara B., Bazay Aya V., Lalina Lyudmila M., Serov Paul A.,
Borisenko Elena S., Kunakkuzin Eugene L.*
Rare Metal Pegmatites of the Kolmozero Lithium Deposit of the Arctic Region
of the Baltic Shield: New Geochronological Data 43
- Subbotin Victor V., Gabov Dmitriy A., Korchagin Alexey U., Savchenko Eugene E.*
Gold and Silver in the Composition of PGE Ores of the Fedorov-Pana Layered Intrusive Complex..... 53
- Nikolay N. Melnikov, Sergey A. Gusak, Vadim A. Naumov*
Use of Small Nuclear Power Plants for Power Supply of the Arctic Solid Mineral Deposits 66
- Nikolay N. Abramov, Jury A. Epimakhov, Eugene V. Kabeev*
Methodical Provision of Geo-Monitoring for Hard Rock Slope Stability 78
- Alexander V. Lovchikov, Stepan N. Savchenko*
Estimation of Possible Partial Excavation of Pillars on the Karnasurt Mine..... 85
- Yury G. Smirnov, Alexander O. Orlov*
Multi-Barrier Safety System for Construction and Exploitation of Underground Small
Nuclear Power Plants Under the Russian Arctic Conditions 93

BIOLOGICAL SCIENCES

- Vladimir A. Masloboev, Vladimir E. Vigdergauz, Dmitriy V. Makarov, Anton V. Svetlov, Dmitriy A. Nekipelov,
Sergey G. Seleznev*
The Methods of Reducing Sulphate Concentrations in the Waste Water of Mining Enterprises 99
- Lyudmila P. Sulimenko, Lyudmila B. Koshkina, Vladimir A. Masloboev*
Practical Aspects of the Use of Local Sorbents for the Renovation of Oil-Contaminated Areas 116
- Igor L. Kalyuzhny*
Forming of Freezing Depth for Bogs of the Kola Peninsula 124

CONFERENCES 139

NEW BOOKS 143

ANNIVERSARIES 146

AD MEMORIAM 156

Editorial Board:

N. K. Belisheva, Dr. Sci. (Bio); P. B. Gromov, PhD (Eng.); V. E. Ivanov, Dr. Sci. (Phys. & Math.); N. A. Kashulin, Dr. Sci. (Bio); A. A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.); P. R. Makarevich, Dr. Sci. (Bio); A. G. Olejnik, Dr. Sci. (Eng.); I. A. Razumova, Dr. Sci. (History); T. V. Rundkvist, PhD (Geol. & Mineral.); V. S. Selin, Dr. Sci. (Econom.); A. F. Usov, PhD (Eng.) — Executive Secretary, A. Ya. Fridman, Dr. Sci. (Eng.) — Head of Editorial Staff

УДК 552.11+553.212

**СОСТАВ ПЛАГИОКЛАЗА В РАЗРЕЗЕ ГЛАВНОГО АНОРТОЗИТОВОГО ПЛАСТА
ЗАПАДНО-ПАНСКОГО ПЛАТИНОНОСНОГО МАССИВА
(КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ, РОССИЯ): НОВЫЕ ДАННЫЕ***

Н. Ю. Грошев, Е. С. Борисенко, Е. Э. Савченко
ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

Аннотация

В статье приводятся новые результаты изучения состава плагиоклаза в главном анортозитовом пласте Западно-Панского массива, вмещающем Южный платиноносный риф. По данным 10 изученных шлифов, из пересекшей анортозиты скважины кумулюсный плагиоклаз в них, так же как и во вмещающих габброноритах, соответствует битовниту и содержит 73–75 % An. Среднее содержание FeO в кумулюсных плагиоклазах анортозитов вдвое меньше, чем в плагиоклазах вмещающих пород, и составляет 0,3 мас. %. По аналогии с порфировыми базальтами, вкрапленники плагиоклаза в которых обеднены железом относительно микролитов основной массы, это объясняется, предположительно, ранней кристаллизацией плагиоклаза анортозитов из расплава. Платинометалльное оруденение в анортозитах не сопровождается значимыми вариациями состава кумулюсного плагиоклаза, и его положение практически совпадает с уровнем предполагаемого просачивания в плагиоклазовые кумулаты интеркумулюсной жидкости из вышележащей толщи. В связи с этим генезис богатых руд Южного рифа, по-видимому, определяется преимущественно позднемагматическим процессом. В совокупности полученные данные свидетельствуют о стратиграфических взаимоотношениях и синхронности образования анортозитов и вмещающих габброноритов.

Ключевые слова:

анортозиты, состав плагиоклаза, Западно-Панский массив, Южный риф.

**NEW DATA ON PLAGIOCLASE COMPOSITION IN THE SECTION
OF THE MAIN ANORTHOSITE LAYER OF THE WEST-PANA PGE-BEARING INTRUSION
(KOLA PENINSULA, RUSSIA)**

Nikolay Yu. Groshev, Elena S. Borisenko, Yevgene E. Savchenko
Geological Institute of the KSC of the RAS

Abstract

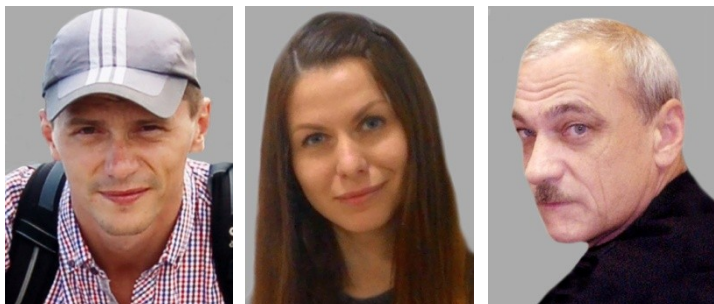
The article presents new microprobe data on compositions of plagioclase in the section of the main anorthosite layer hosting the South PGE Reef of the West-Pana intrusion. According to 10 studied thin sections from the drill hole that has intersected the anorthosites, cumulus plagioclase contains in average 75 % An, the same An content is observed in the underlying cumulates. Average FeO content in cumulus plagioclase of anorthosite is a twice lower than in gabbronorites and equals 0,3 wt. %. Similar to porphyroeous basalts containing less ferrous plagioclase porphyrocrysts and more ferrous plagioclase microliths, it is supposed that the reason of this difference is an earlier crystallization of plagioclase of anorthosite from a less

* Работа подготовлена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 15-35-20501.

ferrous melt. The position of PGE mineralization within the anorthosite layer is not controlled by variations in cumulus plagioclase compositions and coincides with the level of percolation of intercumulus liquid from overlying cumulates. So, it is supposed that the genesis of high-grade PGE ores of the South Reef is rather defined by predominant late-magmatic than early-magmatic processes. Collectively, the data suggest a stratigraphical relationship and a synchronous formation of the anorthosite and underlying gabbro-norites.

Keywords:

anorthosite, plagioclase composition, West-Pana intrusion, South Reef.



Введение

Одна из главнейших целей изучения расслоенных интрузий [1] заключается в определении причин образования слоев пород, сложенных различными наборами минералов [2, 3]. Данные об изменении состава кумулюсных минеральных фаз важны для понимания процессов

образования слоев магматических пород. Вероятно, наиболее подходящим для исследований параметром является состав плагиоклаза, который в связи с крайне медленным диффузионным обменом между CaAl и NaSi [3] сохраняет свой первичный состав в центральных частях зерен, будучи наименее подверженным влиянию взаимодействия с интеркумулюсной жидкостью и отличаясь в этом плане от железомagneзиальных силикатов [2].

Проведенное ранее изучение вариаций состава плагиоклазов в Западно-Панском массиве [4] выявило закономерный рост его основности в направлении Верхнего расслоенного горизонта, что объяснялось участием поздних дополнительных инъекций магмы. Изотопные U-Pb цирконметрические данные [5] показали, что возраст расположенного здесь главного анортозитового пласта моложе, чем возраст подстилающих базитов, примерно на 50 млн лет. Таким образом, согласно имеющимся данным, допускается возможность интродуцирования массива этими анортозитами. Для проверки этого мы использовали детальное изучение состава плагиоклаза по разрезу пласта и во вмещающих породах. До наших исследований оценить эти вариации по всей мощности пласта не представлялось возможным в связи с недостаточностью данных (один анализ плагиоклаза из анортозитов представлен в работе [4]).

Материал и методика исследований

Состав плагиоклаза изучался микронзондовым методом в комбинированных шлифах, изготовленных из материала, отобранного из керна скважины BG-S-30. Всего было изучено 10 шлифов, по которым сделано 79 определений состава плагиоклаза. Измерения выполнены на микроанализаторе MS-46 Cameca. Ускоряющее напряжение — 22 кВ, ток зонда — 30 нА. Время измерения составляло 50 с в каждой точке. В целях предотвращения миграции Na из зоны анализа электронный зонд был расфокусирован до диаметра 10 мкм. В качестве веществ сравнения использовались: лоренценит ($\text{NaK}\alpha$, $\text{TiK}\alpha$), волластонит ($\text{SiK}\alpha$, $\text{CaK}\alpha$), вадеит ($\text{KK}\alpha$), $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ($\text{AlK}\alpha$), гематит ($\text{FeK}\alpha$). Предварительно препараты просматривались на сканирующем электронном микроскопе Leo-1450 в режиме обратно отраженных электронов с целью выявления пригодных для анализа зерен плагиоклаза и конкретных областей в каждом из них.

Геолого-петрографическая характеристика

Западно-Панский массив входит в состав палеопротерозойского (2,5 млрд лет) Федорово-Панского интрузивного расслоенного комплекса, расположенного в центральной части Кольского п-ова (рис. 1). В массиве протяженностью 30 км и мощностью более 3,5 км преобладают однородные мезократовые породы базитового состава. Расслоенность, отчетливо проявленная на двух уровнях разреза — в Нижнем и Верхнем расслоенных горизонтах, а также в перекрывающем последний Оливиновом горизонте, — имеет юго-западное пологое падение. Подробное описание геологического строения и платинометалльного оруденения Западно-Панского массива приведено в работах [4, 6–8].

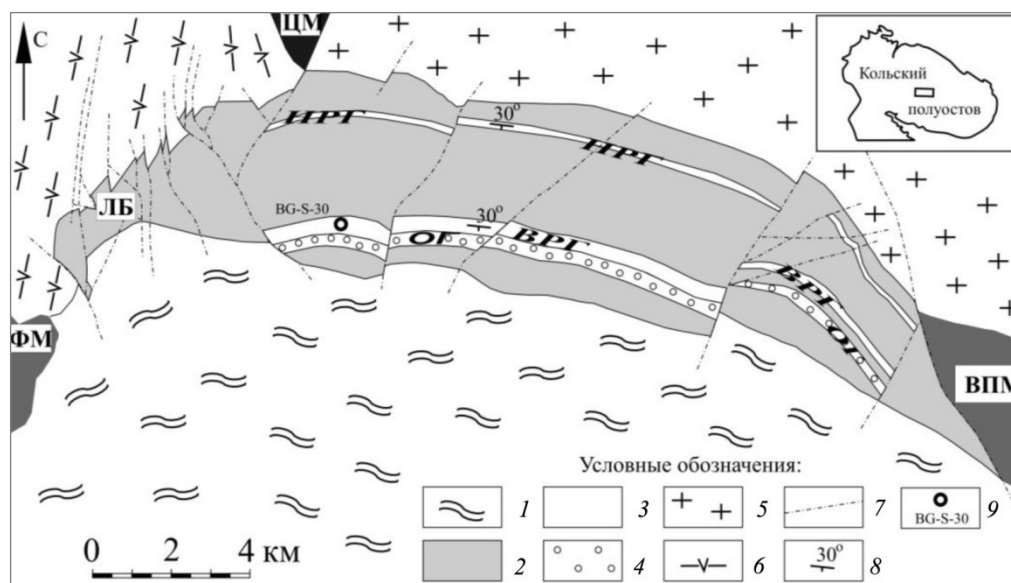


Рис. 1. Схема геологического строения Западно-Панского массива (с изменениями, по [6]):

ЦМ — Цагинский габбро-анортозитовый массив архейского возраста; ФМ, ЛБ и ВПМ — Федоровотундровский массив, Ластьяврский блок и Восточно-Панский массив Федорово-Панского комплекса;

1 — вулканогенно-осадочные породы зоны Имандра-Варзуга; породы Западно-Панского массива: 2 — габбронориты, 3 — расслоенные горизонты (НРГ — Нижний, ВРГ — Верхний), 4 — Оливиновый горизонт (ОГ); 5 — архейские щелочные граниты массива Белых тундр; 6 — архейские диорито-гнейсы; 7 — разрывные нарушения; 8 — элементы залегания расслоенности; 9 — местоположение скважины BG-S-30

Главный анортозитовый пласт (ГАП) располагается в основании Верхнего расслоенного горизонта, который представляет собой толщу габброноритов мощностью 100–150 м, содержащую прослойки и линзы норитов и анортозитов. В отличие от других стратиформных анортозитов Западно-Панского массива, распространенных в Нижнем расслоенном и Оливиновом горизонтах, ГАП сравнительно выдержан по простиранию, имеет большую мощность (10–15 м) и не сопровождается комплементарными магнезиально-железистыми кумулатами, залегая среди мезократовых пород. В кровле ГАП в виде крайне прерывистых линз встречается вкрапленная сульфидная минерализация, во всех пересечениях экстремально обогащенная ЭПГ (до 40 г/т) и известная в литературе как Южный платиноносный риф. Перечисленные особенности пласта делают его важным маркирующим горизонтом и позволяют выделить в статусе главного среди анортозитов массива.

Разрез ГАП был детально изучен в скважине BG-S-30, пробуренной на участке Южный Каменник в 2012 г. (рис. 2). В заданной под прямым углом к пласту скважине он пересечен на протяжении 13 м (в интервале 26,35–39,70 м). В лежащем боку залегают массивные и трахитоидные габбронориты (плагноклаз-авгит-энстатитовые кумулаты) мелко-среднезернистого сложения, которые вверх по разрезу в зоне мощностью около 1 м постепенно переходят к крупно-среднезернистым анортозитам (рис. 2). В висячем боку пласт перекрыт метровым слоем норитов (плагноклаз-энстатитовых кумулатов) с резким нижним контактом между ними. Перекрывающие габбронориты (плагноклаз-авгит-энстатитовые кумулаты) представлены чередованием средне- и крупнозернистых разновидностей с участком такситовых пород в интервале 20,70–22,85 м.

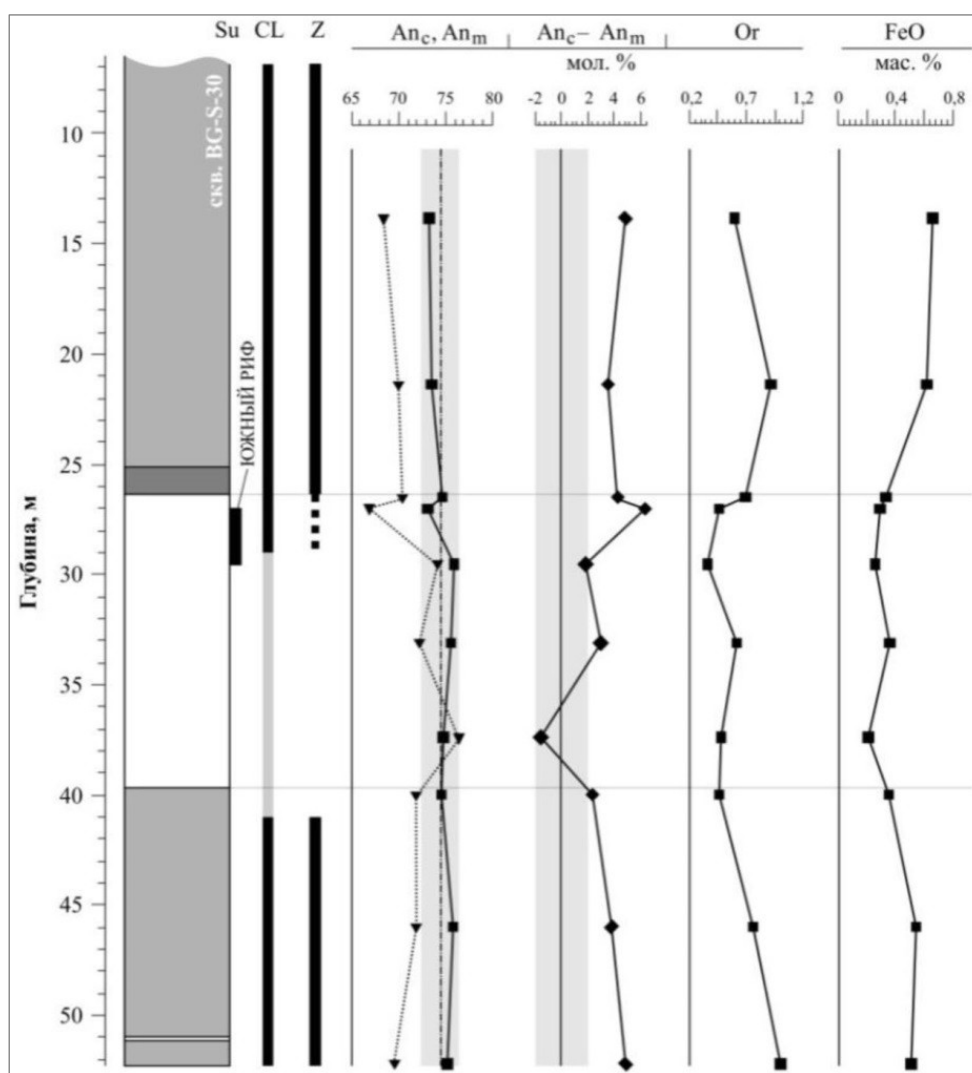


Рис. 2. Анортозитовый пласт (белое) во вмещающих габброноритах (серый цвет) и норитах (темно-серый цвет) с вариациями окраски, зональности и состава плагноклаза по разрезу скважины BG-S-30:

An_c , An_m — содержание An в кумулатном ядре (квадраты) и кайме (треугольники) плагноклаза, серым выделено поле погрешности анализа; Su — сульфидная минерализация; CL — цвет плагноклаза в породе: черный и светло-серый; Z — типы зональности плагноклаза по окраске в шлифах (сплошная линия — серое с буроватым оттенком ядро и бурая кайма, пунктир — бесцветное ядро и бурая кайма, нет линии — бесцветные ядро и кайма)

Плагиоклазовые кумулаты, слагающие ГАП, неоднородны и представлены незакономерным чередованием лейкоабброноритов (78–90 об. % плагиоклаза) и анортозитов (> 90 об. % плагиоклаза). Помимо главного минерала, кумулусного плагиоклаза, лейкоаббронориты содержат интрекумулусные клинопироксен (2–12 %), ортопироксен (5–10 %), кварц (до 1 %) и рудные минералы (до 5 %). Вторичные минералы представлены амфиболом, замещающим преимущественно ортопироксен, и минералами соссюритовой ассоциации. Темноцветные минералы анортозитов, как правило, полностью замещены амфиболом и биотитом. Вторичные изменения, сконцентрированные в анортозитах в интеркумулусном пространстве, практически не затрагивают кумулусный плагиоклаз. В породах ГАП аксессуарные минералы включают циркон, бадделеит, апатит, эпидот, титанит, рутил, биотит, а рудные минералы — халькопирит, борнит, миллерит, пентландит, пирротин, магнетит, ильменит и, кроме того, широкий спектр минералов платиновой группы (высоцит, куперит-бреггит, котульскит, кейтконнит, мончеит, теллурупалладинит, сперрилит, стиллуотерит, торнроозит и др.) [8].

Состав кумулусного плагиоклаза

Вариации состава плагиоклаза в расслоенных интрузиях определяются составом кумулусного минерала, выделившегося в раннемагматическую стадию кристаллизации расплава. Понятие кумулусного плагиоклаза, изначально введенное Л. Уэйджером с коллегами [9], подразумевает наличие в нем центральной части (кумулусного ядра) и периферической оболочки (интрекумулусной каймы). В зависимости от характера различий в составе ядра и каймы минерал может иметь прямую или обратную зональность [3]. В настоящей работе используется 46 составов кумулусного плагиоклаза, усредненный состав которого приведен в табл. 1. В каждом шлифе определялся состав, как правило, пяти кумулусных участков зерен. Из расчета исключены единичные резко отличные по содержанию An анализы, которые попадают на участок зерна, близко расположенный к кайме, или двойниковый шов кристалла. Стандартное отклонение полученных средних содержаний An изменяется от $\pm 0,9$ до 2,6 % и в большинстве случаев менее чем ± 2 %. По аналогии с детальными исследованиями плагиоклазов Бушвельда [2, 10] мы принимаем, что пределы неопределенности для всех использованных средних значений составляют ± 2 % An. На рис. 2 показано среднее содержание An в кумулусных зернах (An_c) для всех образцов в зависимости от глубины скважины.

Таблица 1

Средний химический состав кумулусных ядер плагиоклазов, мас. %

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	13,85	21,40	26,50	27,00	29,53	33,10	37,40	40,00	46,00	52,20
	<i>n</i> = 4	<i>n</i> = 5	<i>n</i> = 5	<i>n</i> = 5	<i>n</i> = 5	<i>n</i> = 4	<i>n</i> = 5	<i>n</i> = 4	<i>n</i> = 4	<i>n</i> = 5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	50,29	50,56	50,17	49,75	48,97	49,95	49,94	50,29	49,33	50,08
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	–
Al ₂ O ₃	30,60	30,34	30,79	31,04	31,79	31,31	31,21	30,63	31,16	30,48

Na ₂ O	3,02	2,97	2,79	3,10	2,68	2,74	2,83	2,89	2,70	2,91
K ₂ O	0,10	0,16	0,12	0,08	0,06	0,11	0,08	0,08	0,13	0,17
Сумма	99,63	99,55	99,12	99,51	99,17	99,76	99,47	99,48	99,21	99,34
Коэффициенты в формуле (O = 8)										
Si	2,309	2,322	2,309	2,287	2,258	2,288	2,292	2,310	2,277	2,307
Al	1,656	1,642	1,670	1,682	1,727	1,690	1,688	1,658	1,695	1,655
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	–
Fe	0,025	0,024	0,013	0,011	0,009	0,015	0,008	0,015	0,021	0,020
Ca	0,736	0,733	0,736	0,751	0,762	0,749	0,748	0,747	0,759	0,750
Na	0,269	0,264	0,249	0,276	0,239	0,243	0,252	0,257	0,242	0,260
K	0,006	0,009	0,007	0,005	0,004	0,006	0,005	0,005	0,008	0,010
Сумма	5,000	4,994	4,984	5,012	5,000	4,992	4,992	4,992	5,001	5,001
Or	0,60	0,92	0,69	0,46	0,36	0,65	0,48	0,48	0,77	1,00
Ab	26,59	26,25	25,14	26,78	23,82	24,36	25,06	25,47	23,97	25,46
An	72,81	72,83	74,17	72,76	75,82	74,99	74,46	74,05	75,27	73,54
An _c	73,25	73,51	74,69	73,10	76,10	75,48	74,82	74,41	75,85	74,28
An _{c,min}	71,58	71,91	72,20	70,40	74,80	72,49	71,40	73,48	73,69	72,32
An _{c,max}	75,50	74,32	78,75	74,30	78,00	76,91	76,10	76,06	77,29	75,44

Примечание. Здесь и в табл. 2: 1–2 — габбронориты висячего бока, 3–7 — породы ГАП, 8–10 — габбронориты лежащего бока. An_c = 100·An/(An + Ab), мол. %; An_{c,min}, An_{c,max} — пределы вариаций номера плагиоклаза в частных определениях.

По разрезу ГАП средняя доля An в кумулюсном плагиоклазе варьирует от 73 до 76 %, не выходя за пределы поля ошибки, построенного относительно среднего номера плагиоклаза в анортозитах (74,8 %, $n = 24$). В подстилающей толще, включая габбронориты с неокрашенным плагиоклазом из области постепенного нижнего контакта пласта (рис. 2), состав плагиоклаза является таким же (74–76 % An). Немногим более кислый плагиоклаз перекрывающей толщи (рис. 2), также находясь в поле ошибки, варьирует в узких пределах (73–74 % An, табл. 1). Таким образом, эти данные показывают, что состав кумулюсного плагиоклаза в изученном разрезе значимо не изменяется, соответствуя битовниту.

Отсутствие различий в составе плагиоклаза анортозитов и вмещающих пород предполагает их сингенетичность, не подтверждая возможность позднего внедрения анортозитов в габбронориты. В пользу этого также свидетельствуют постепенный нижний контакт пласта и плавное снижение содержания Or при переходе от подстилающих пород к анортозитам (рис. 2). Более того, судя по практически вдвое меньшему, чем в габброноритах, содержанию FeO в кумулюсном плагиоклазе анортозитов, вероятной представляется его более ранняя кристаллизация по сравнению с плагиоклазом вмещающих пород из менее насыщенного

железом расплава. Такую интерпретацию поддерживают данные о содержании железа в плагиоклазах порфировых базальтовых лав современных вулканов: порфировкрапленники плагиоклаза в них содержат 0,3–0,6 мас. % FeO, в то время как микролиты плагиоклаза основной массы — 0,8–0,9 мас. % [12].

Важным и показательным в сравнении с промышленными рифовыми месторождениями Западно-Панского массива является отсутствие значительных изменений основности плагиоклаза в месте пересечения Южного рифа (рис. 2), чему яркий пример — платинометалльное месторождение Киевей в Нижнем расслоенном горизонте [6]. Согласно микрозондовым данным [4] и нормативным пересчетам состава пород [11], для этого месторождения установлено, что наиболее богатые платиноносные горизонты расположены в интервалах с максимальными содержаниями An в плагиоклазе. Они содержат заметно более основной плагиоклаз, отличающийся от состава плагиоклаза рудовмещающих пород на 4–10 % An. Такое соотношение богатого оруденения и скрытой расслоенности предполагает, что в образовании месторождения Киевей определяющую роль играл раннемагматический процесс, отразившийся в составе наиболее раннего и распространенного породообразующего минерала. Наблюдаемое в Южном рифе соотношение, наоборот, не выделяет раннемагматические события анортозитовой толщи в качестве определяющих рудообразование.

Зональность плагиоклаза

Практически во всех изученных шлифах плагиоклаз обладает прямой зональностью, когда кайма более кислого состава окружает кумулюсное ядро более основного состава. Состав каймы (An_m) определен в каждом шлифе и охарактеризован в общем 23 микрозондовыми анализами (рис. 2, табл. 2).

Таблица 2

Средний химический состав каймы кумулюсных плагиоклазов, мас. %

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	13.85	21.40	26.50	27.00	29.53	33.10	37.40	40.00	46.00	52.20
	$n = 3$	$n = 2$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 2$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 3$	$n = 2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	51,48	51,19	51,28	51,04	49,64	50,67	49,91	51,11	50,15	51,53
TiO ₂	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	–
Al ₂ O ₃	29,90	30,15	30,01	30,20	31,85	31,36	30,88	30,52	30,81	29,68
FeO	0,69	0,56	0,52	0,21	0,36	0,25	0,24	0,24	0,61	0,49
CaO	13,87	14,17	13,90	14,32	14,86	14,54	15,40	14,56	14,63	14,05
Na ₂ O	3,54	3,36	3,22	3,93	2,87	3,08	2,62	3,12	3,14	3,41
K ₂ O	0,07	0,14	0,15	0,07	0,05	0,09	0,36	0,06	0,09	0,21
Сумма	99,56	99,57	99,10	99,77	99,64	99,98	99,41	99,62	99,42	99,37
Коэффициенты в формуле (O = 8)										
Si	2,357	2,345	2,355	2,335	2,274	2,308	2,296	2,335	2,305	2,363
Al	1,613	1,627	1,624	1,628	1,720	1,684	1,674	1,644	1,669	1,604

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ti	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	–
Fe	0,026	0,021	0,020	0,008	0,014	0,009	0,009	0,009	0,023	0,019
Ca	0,680	0,695	0,684	0,702	0,729	0,710	0,759	0,713	0,721	0,690
Na	0,314	0,298	0,287	0,349	0,255	0,272	0,234	0,276	0,280	0,303
K	0,004	0,008	0,009	0,004	0,003	0,005	0,021	0,003	0,005	0,012
Сумма	4,995	4,995	4,980	5,027	4,995	4,988	4,994	4,982	5,003	4,992
Or	0,39	0,82	0,92	0,40	0,32	0,50	2,04	0,33	0,51	1,21
Ab	31,45	29,76	29,29	33,04	25,79	27,56	23,11	27,83	27,85	30,17
An	68,16	69,41	69,79	66,56	73,89	71,94	74,86	71,83	71,63	68,62
An _m	68,43	69,99	70,43	66,83	74,12	72,30	76,43	72,07	72,01	69,46
An _m min	65,86	68,69	68,36	65,60	72,40	–	74,80	71,12	68,25	68,59
An _m max	71,75	71,30	72,51	68,10	75,80	–	78,10	72,72	73,94	70,33

Примечание. An_m = 100 · An / (An + Ab), мол. %; An_mmin, An_mmax — пределы вариаций номера плагиоклаза в частных определениях.

Зональность отчетливо наблюдается по характеру погасания полисинтетических двойников и различным образом подчеркивается в окраске минерала из анортозитов и габброноритов (рис. 3). В разрезе анортозитового пласта преобладает плагиоклаз, который в шлифах не окрашен (рис. 3, а), что соотносится с его светло-серым цветом в породе (рис. 2). Разность состава кумулюсного ядра и каймы этих плагиоклазов An_c – An_m варьирует от –2 до 3 %. Такие же низкие значения эта разность принимает в габброноритах из зоны постепенного нижнего контакта пласта, содержащей бесцветный в породе плагиоклаз. В остальных участках вмещающие породы содержат черный плагиоклаз, цвет которого коррелируется с бурой окраской минерала в шлифах (рис. 3, в). В целом габбронориты характеризуются относительно высокой разностью An_c – An_m — от 4 до 5 %. Ее увеличение по сравнению с анортозитами сопровождается увеличением ширины каймы плагиоклаза, особенно проявленной в габброноритах висячего бока, где кайма может слагать до трети от объема зерна, указывая на высокую долю интеркумулусной жидкости в породе.

Следует отметить, что в верхней части пласта, где расположен платиноносный риф, плагиоклаз анортозитов имеет черный цвет (рис. 2), причем окраска минерала в обычном шлифе не проявляется. Изучение толстых шлифов, однако, показывает наличие относительно тонкой бурой каймы у значительной части зерен (рис. 3, б), которая, очевидно, и обуславливает цвет минерала в породе. Состав этой каймы существенно более кислый, чем в нижележащих анортозитах, близок к составам кайм плагиоклазов из перекрывающих габброноритов (рис. 2), как и разность An_c – An_m (4–6 %). Таким образом, судя по отмеченным выше признакам обогащенности перекрывающей толщи интеркумулусным расплавом и близости состава каймы плагиоклаза в ней и в сопряженном интервале анортозитов, можно предположить, что эта часть пласта подверглась просачиванию интеркумулусной жидкости сверху в частично консолидированные плагиоклазовые кумулаты.

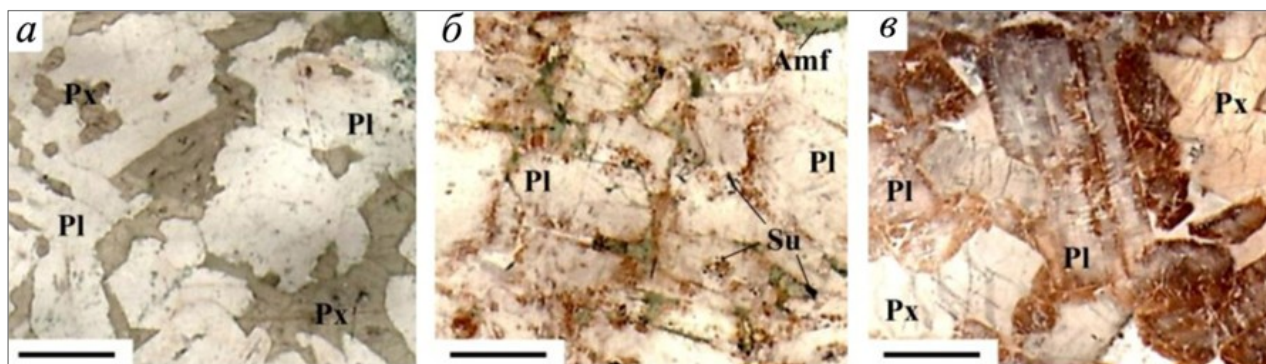


Рис. 3. Распределение окраски плагиоклаза в лейкогабброноритах (а) (гл. 29,53 м), анортозитах (б) (гл. 27,0 м) и габброноритах висячего бока (в) (гл. 13,85 м). Сканированные толстые (~ 100 μm) шлифы. Масштабная линейка 2 мм

Распределение черной окраски плагиоклаза в ГАП, отражающее вероятную глубину проникновения в анортозиты интеркумулусной жидкости из вышележащей толщи, практически совпадает с положением обогащенных ЭПГ сульфидов Южного рифа в скважине BG-S-30 (рис. 2). Ранее изученная соседняя скважина BG-S-29 [13], анортозитовый пласт в которой не содержит ни сульфидной, ни платинометалльной минерализации, характеризуется исключительно светло-серым цветом плагиоклаза ГАП. Таким образом, связь между глубиной просачивания интеркумулусной жидкости, предполагаемой по окраске и составу каймы кумулусного плагиоклаза, и положением платинометалльного оруденения в верхней части пласта свидетельствует о преобладающей роли позднемагматического процесса, наложенного на анортозиты при формировании Южного рифа.

Выводы

Первые систематические микрозондовые данные о составе плагиоклаза по разрезу ГАП позволяют сделать следующие выводы.

1. Кумулусный плагиоклаз анортозитового пласта и подстилающих пород идентичен по составу и в среднем соответствует битовниту с номером 75. Перекрывающие породы содержат в кумулусе битовнит со средним номером 73, однако эти различия находятся в пределах статистической погрешности. Таким образом, исследования показывают, что состав кумулусного плагиоклаза в изученном разрезе значительно не изменяется.

2. Кумулусный плагиоклаз анортозитов содержит вдвое меньшее количество примеси FeO (0,3 мас. %), чем кумулусный плагиоклаз вмещающих пород. Это различие коррелируется с окраской ядер плагиоклазов в шлифах: в анортозитах они бесцветны, во вмещающих габброноритах окрашены в серый с буроватым оттенком цвет. Предположительно, обеднение плагиоклаза анортозитов железом связано с его более ранней кристаллизацией относительно плагиоклаза вмещающих габброноритов.

3. Кумулусный плагиоклаз вмещающих габброноритов обрастает более кислой (на 4–5 мол. %) каймой бурого цвета, за исключением переходных подстилающих пород вблизи подошвы пласта, где кайма не отличается от центральных частей ни по цвету, ни по составу. В анортозитах состав каймы в пределах ошибки идентичен составу кумулусного ядра. Исключение составляет верхний

рудоносный интервал анортозитов, часть кумулюсных плагиоклазов которого обрастает более кислой каймой бурого цвета, образовавшейся, вероятно, в результате просачивания интеркумулусной жидкости.

4. Положение платинометалльного оруденения ГАП не выделяется в вариациях состава кумулюсного плагиоклаза и практически совпадает с предполагаемым уровнем проникновения интеркумулусной жидкости. В связи с этим генезис богатых руд Южного рифа в кровле ГАП, по-видимому, определяется преимущественно позднемагматическим процессом.

5. Приведенные особенности геологического строения и петрографии пласта, одинаковое содержание анортита в кумулюсном плагиоклазе в анортозитах и вмещающих породах свидетельствуют о стратиграфических взаимоотношениях и синхронности образования ГАП и подстилающих его пород и не поддерживают гипотезу о более позднем внедрении этих анортозитов. Вопрос о формировании перекрывающей толщи в результате дополнительной инъекции магмы [13], обсуждавшийся ранее, требует дальнейшего изучения.

Таким образом, исследование состава плагиоклаза может предоставить важную информацию для объяснения петрогенезиса анортозитов и происхождения платинометалльной минерализации в расслоенных интрузивах. В дальнейшем изученный разрез планируется детализировать дополнительными анализами в рудной части анортозитов (для подтверждения отсутствия здесь скрытой расслоенности и изучения, очевидно, связанных процессов рудообразования и миграции интеркумулусной жидкости), а также в перекрывающей толще (для поиска свидетельств внедрения новой порции расплава).

Авторы выражают благодарность А. У. Корчагину (ОАО «Пана») за возможность использования материалов бурения. Критические замечания В. В. Чащина, П. В. Припачкина, Т. В. Рундквист (ГИ КНЦ РАН) и анонимного рецензента к первоначальному варианту статьи способствовали ее улучшению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Igneous Layering in Basaltic Magma Chambers / O. Namur [et al.] // Layered Intrusions. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. P. 75–152.
2. Cawthorn R. G., Ashwal L. D. Origin of Anorthosite and Magnetite Layers in the Bushveld Complex, Constrained by Major Element Compositions of Plagioclase // J. Petr. 2009. No. 9 (50). P. 1607–1637.
3. Morse S. A., Nolan K. M. Origin of strongly reversed rims on plagioclase in cumulates // Earth and Planetary Sci. Let. 1984. No. 3 (68). P. 485–498.
4. Латыпов Р. М., Чистякова С. Ю. Механизм дифференциации расслоенного интрузива Западно-Панских тундр. Апатиты: КНЦ РАН, 2000. 315 с.
5. Баянова Т. Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб.: Наука, 2004. 174 с.
6. Платинометалльное месторождение Киевей в Западно-Панском расслоенном массиве: геологическое строение и состав оруденения / А. У. Корчагин [и др.] // Стратегические минеральные ресурсы Лапландии — основы устойчивого развития Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 2009. С. 12–32.
7. Геология и вещественный состав руд малосульфидного платинометалльного месторождения Северный Каменник в Западно-Панском массиве (Кольский полуостров, Россия) / А. У. Корчагин [и др.] // Руды и металлы. 2016. № 1. С. 42–51.
8. Субботин В. В., Корчагин А. У., Савченко Е. Э. Платинометалльная минерализация Федорово-Панского рудного узла: типы оруденения, минеральный состав, особенности генезиса // Вестник КНЦ. 2012. № 1 (8). С. 55–66.
9. Wager L. R., Brown G. M., Wadsworth W. J. Types of Igneous Cumulates // J. Petr. 1960. (1). P. 73–85.
10. Harney D. M. W., Von Gruenewaldt G., Merkle R. K. W. The use of plagioclase composition as an indicator of magmatic processes in the Upper Zone of the Bushveld Complex // Mineralogy and Petrology. 1996. No. 1 (56). P. 91–103.
11. Concentrations of trace elements in rocks of the Lower layered horizon of the West-Pana intrusion / N. Yu. Groshev [et al.] / Abstracts, 12th International Platinum Symposium, 11-14 August 2014. Ekaterinburg, 2014. P. 65–66.
12. Леснов Ф. П. Плагиоклазы полигенных базит-гипербазитовых плутонов. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1991. 110 с.
13. Грошев Н. Ю., Рундквист Т. В., Базай А. В. Находка кордиеритовых роговиков в верхнем расслоенном горизонте Западно-Панского массива на Кольском полуострове // ЗРМО. 2015. № 2 (144). С. 82–98.

Сведения об авторах

Грошев Николай Юрьевич — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: nikolaygroshev@gmail.com

Борисенко Елена Сергеевна — младший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: elena.s.borisenko@gmail.com

Савченко Евгений Элланович — инженер Геологического института КНЦ РАН

E-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

Author Affiliation

Nikolay Yu. Groshev — PhD (Geology and Mineralogy), Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: nikolaygroshev@gmail.com

Elena S. Borisenko — Junior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: elena.s.borisenko@gmail.com

Yevgene E. Savchenko — Engineer at the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

Грошев, Н. Ю. Состав плагиоклаза в разрезе главного анортозитового пласта Западно-Панского платиноносного массива (Кольский полуостров, Россия): новые данные / *Н. Ю. Грошев, Е. С. Борисенко, Е. Э. Савченко* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 1 (9). — С. 5–15.

Reference

Groshev Nikolay Yu., Borisenko Elena S., Savchenko Yevgene E. New Data on Plagioclase Composition in the Section of the Main Anorthosite Layer of the West-Pana PGE-Bearing Intrusion (Kola Peninsula, Russia). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1 (9), pp. 5–15 (In Russ.).

УДК 551.1+551.58

ЭВОЛЮЦИЯ КЛИМАТА С ПОЗИЦИЙ НОВОЙ ГИПОТЕЗЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В. Я. Евзеров

ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

Аннотация

Рассмотрена эволюция климата с позиций новой гипотезы образования Земли. Показано, что в изменении климата определяющую роль играло внутреннее тепло, генерируемое веществом ядра Земли вследствие воздействия на него космического излучения. Размер ядра со временем уменьшается, и Земля остывает.

Ключевые слова:

внутренняя энергия Земли, солнечное тепло, климат.

EVOLUTION OF CLIMATE FROM THE STANDPOINT OF A NEW HYPOTHESIS OF THE EARTH FORMATION

Vladimir Ya. Yevzerov

Geological Institute of the KSC of the RAS

Abstract

The climate evolution from the standpoint of a new hypothesis of the Earth formation has been considered. It has been shown that the internal heat, generated by the substance of the Earth's core, played a decisive role in the climate change due to impact of cosmic radiation on it. The size of the core decreases with time and the Earth cooling-down. According to the new hypothesis of the Earth formation, after the formation of the Earth's crust from the melt generating elements under the influence of cosmic radiation on the Earth's core continues. This leads to the increase in the substance volume in plasma state and in the internal pressure. The earth's crust warms up with the accumulation of the substance and from a certain moment a warm and even climate is set on the Earth's surface; thermoera comes. When the internal pressure exceeds the roof strength the introduction of magma occurs.

The devastation of the magma reservoir leads to cooling of the Earth's crust and the formation of cover glaciation; comes. Thermoeras and glacioeras repeatedly alternate in the Earth's history. The last glacioera began in the Miocene and continues to this day. The leading role in the climate change belongs to the Sun. The current warming is caused by the introduction of large masses of magma. It is temporary and will not fundamentally alter the climate situation in the near future. However, due to reducing the core size, the Earth cools down, and the climate will inevitably deteriorate.

Keywords:

Earth internal energy, solar heat, climate.



Одна из сложнейших проблем современного естествознания заключается в выяснении причин изменения климата Земли и прогнозировании его вариаций в будущем. Концепция орбитальной теории палеоклимата изложена в капитальной работе В. А. Большакова [1]. Автор пришел к выводу о том, что «степень и характер климатического воздействия вариаций орбитальных элементов зависят от глобального палеоклиматического состояния Земли (от термоэры до гляциоэры), определяемого, скорее всего, как земными, так и

космическими причинами». Однако конкретный характер этой зависимости остался не выясненным. Современная гипотеза образования Земли не дает удовлетворительного объяснения ни источника внутреннего тепла, ни периодичности поступления тепла в больших количествах.

Сравнительно недавно опубликована новая гипотеза образования нашей планеты [2, 3–5]. Она позволяет объяснить природу источника внутреннего тепла и, соответственно, климатических изменений на поверхности Земли. М. И. Дубровский назвал ее гипотезой Г. В. Трофимова и Ю. И. Лесового, поскольку Г. В. Трофимов предложил ее еще в 2002 г., но, к сожалению, не опубликовал. Согласно этой гипотезе, Земля сформировалась из апейрона (первовещества или нуклонного вещества), выброшенного из Солнца. Его первоначальный размер, вероятно, не превышал сотен метров. В настоящее время размер нуклонного ядра, по расчетам Г. В. Трофимова, составляет 180 м в диаметре.

В результате взаимодействия ядра с космическим излучением формировались элементы, что увеличивало объем вещества в плазменном состоянии. Охлаждение плазмы вело к образованию расплава, в котором происходила жидкостная дифференциация, и к формированию плотной атмосферы легколетучих веществ. «Из-за больших потерь тепловой энергии излучением в космос на поверхности Земли началась кристаллизация расплава с образованием зоны, соответствующей по составу континентальной (гранодиоритовой) коре и покрывающей всю поверхность планеты. В это же время произошла конденсация определенного количества воды и образование маломощной гидросферы, начался геологический этап исторического развития Земли» [3]. На протяжении этого этапа отчетливо прослеживаются две тенденции: остывание Земли и увеличение мощности литосферы во времени. После возникновения земной коры под ней продолжалось образование элементов и их соединений в плазменном состоянии, но интенсивность этих процессов уменьшилась вследствие сокращения размера ядра и некоторого уменьшения проникновения нейтринного облучения через образованные зоны расплава и твердую оболочку [3–5]. Процесс развивался циклически. Каждый цикл включает в себя увеличение объема плазмы вследствие образования элементов и их соединений до тех пор, пока внутреннее давление не превысит прочность кровли. Разрушение кровли приводит к остыванию плазмы, формированию магмы. Накопление значительного количества вещества в плазменном состоянии влекло за собой прогревание земной коры, вследствие которого с определенного момента на поверхности Земли устанавливался более или менее однородный теплый климат, имели место так называемые термоэры.

Прорыв расплавом земной коры неизбежно приводил к истощению ее резервуара и, соответственно, остыванию литосферы вследствие значительных потерь тепловой энергии излучением в космос. После проявления каждого из магматических циклов в результате постепенного остывания поверхности Земли термоэра сменялась гляциоэрой, в период которой в той или иной степени развивались оледенения. Климатическая обстановка гляциоэры в какой-то мере, вероятно, напоминала современную. В настоящее время климат определяется в основном количеством солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли. Как известно, сейчас максимально прогреваются низкие широты, а на Южном полюсе развит мощный ледниковый покров Антарктиды. На Северном полюсе аналогичный покров отсутствует только потому, что в этом районе нет континента.

Н. М. Чумаков выделяет в истории Земли три климатических этапа: безледный (до примерно 2,9 млрд лет), эпизодический ледниковый (2,9 — около 1(?) млрд лет) и самый молодой периодически ледниковый [6]. В первый этап литосфера имела небольшую мощность и хорошо прогревалась образующимся из апейрона веществом в плазменном состоянии. Поэтому

даже при прорыве кровли и значительном опустошении внутреннего резервуара, которое приводило к охлаждению литосферы, температура на поверхности Земли оставалась положительной. Только на втором этапе возросшая мощность литосферы способствовала проявлению отрицательных температур и возникновению оледенений на поверхности Земли.

Точно определить продолжительность термоэзр и промежутков между ними практически невозможно, поскольку ни один из методов датирования геологических образований не позволяет установить абсолютный возраст. Получаемые оценки возраста могут приниматься только в случае их согласованности с геологическими, петрологическими, геохимическими и палеонтологическими данными, но они не являются абсолютными.

Попытку установления ритмичного чередования термо- и гляциоэзр за последний миллиард лет предпринял Б. Джон [7] (рис. 1, а). Автор полагает, что продолжительность гляциоэзр составляла от десятков до примерно 200 млн лет (в среднем 20–50 млн лет) и что они повторялись через примерно равные промежутки времени порядка 150 млн лет. Однако следы обширного оледенения около 150 млн лет не обнаружены, что Б. Джон [7] объясняет отсутствием крупных массивов околополюсной суши. Представляется более вероятным, что к мезозою литосфера достигла значительной мощности и внутреннее давление вещества в плазменном состоянии уже не могло преодолеть прочность кровли. Поэтому не имело места значительное остывание литосферы после прорыва кровли и соответствующее ему оледенение в юрский период. Более того, по мере непрерывного увеличения мощности литосферы во времени температура на поверхности Земли постепенно снижалась.

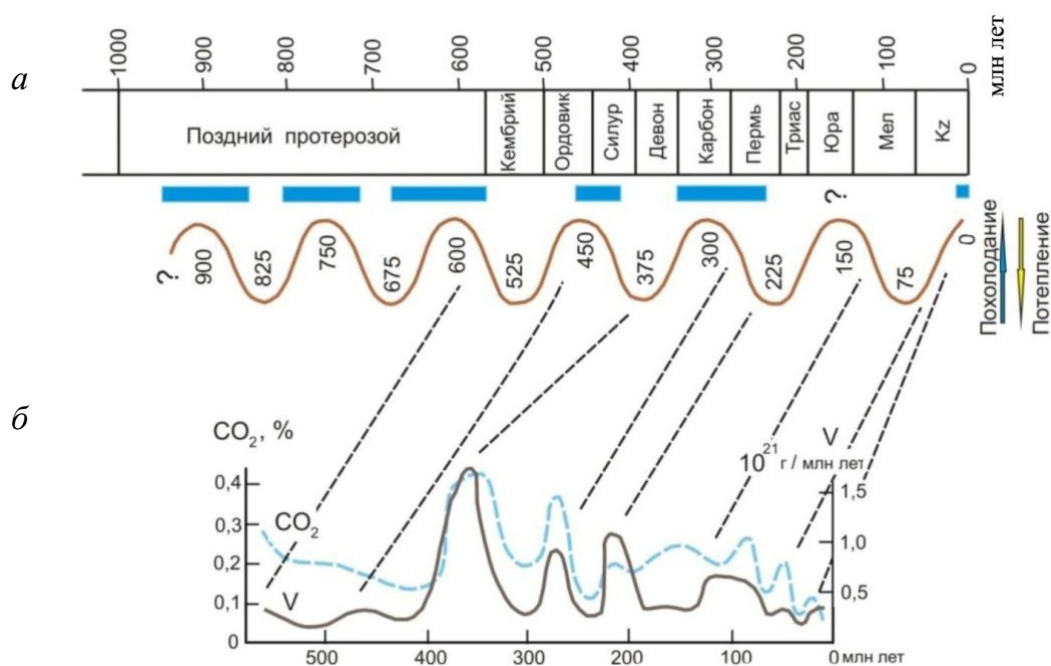


Рис. 1. Предполагаемые изменения климата за последний миллиард лет и некоторые показатели внутренней активности Земли в фанерозое:

а — гипотетическая последовательность ледниковых (гляциоэзр) и «теплых» (термоэзр) периодов за последний миллиард лет. Четко выявляется повторяемость ледниковых периодов через 150 млн лет, если не считать отсутствия ледникового периода в юрское время. Синие полосы показывают предполагаемую продолжительность ледниковых периодов [7]; б — изменение количества CO₂ в атмосфере и скорость образования вулканических пород в течение фанерозоя [8]

Существование строгой ритмичности гляциоэр представляется маловероятным, поскольку и земные, и космические условия в столь длительный промежуток времени не оставались постоянными. Как отмечалось, во времени уменьшался объем ядра и изменялась интенсивность его нейтринного облучения. Однако наблюдается некоторое соответствие между проявлениями периодов внутренней активности Земли и ритмами, выделенными Б. Джоном, на что указывает сопоставление графиков, приведенных на рис. 1. Следует отметить, что график (рис 1, а) должен иметь наклон: каждая последующая термоэра, вероятно, была немного холоднее предыдущей в связи с возрастанием во времени мощности литосферы.

Опорными для палеоклиматических реконструкций являются, безусловно, материалы по фанерозою, палеоклиматические пояса которого восстановлены на основе детальных и разносторонних палеонтологических и литологических исследований. Подробные сведения о них обобщены в обстоятельной работе С. А. Ушакова и Н. А. Ясаманова [9]. Термоэре девона, например, на графике Б. Джона соответствует палеоклиматическая поясность среднего и позднего девона, приведенная на рис. 2.

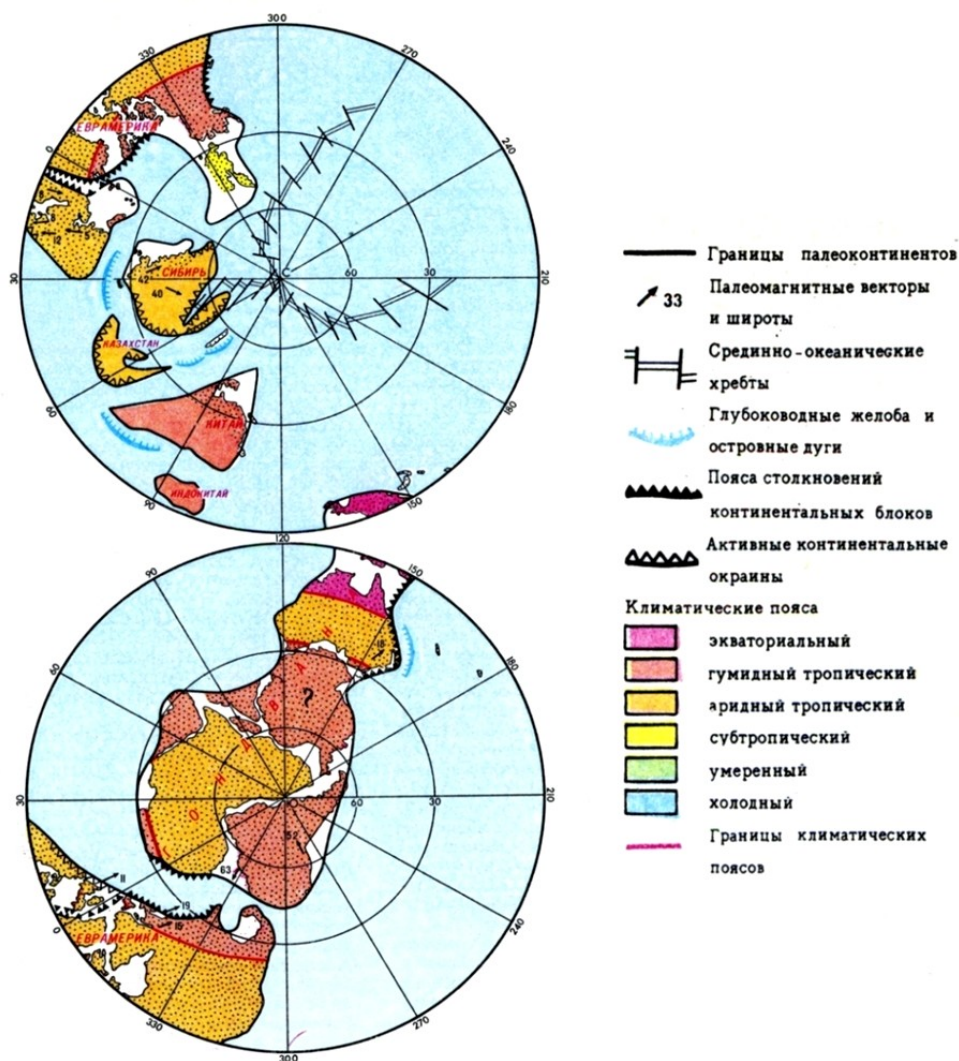


Рис. 2. Палеоклиматическая поясность среднего и позднего девона (приводится по: [9])

Обращает на себя внимание наличие континента на Южном полюсе. Однако в его пределах господствовали аридный и гумидный тропический климаты, что можно объяснить поступлением значительного количества тепла из недр Земли. Вероятно, как в упомянутую, так и в остальные термоэры накопление значительного количества вещества в плазменном состоянии влекло за собой, как отмечалось, прогревание земной коры, вследствие которого с определенного момента на поверхности Земли устанавливался более или менее однородный теплый климат. Гляциоэре карбона и начала перми на графике Б. Джона соответствует палеоклиматическая поясность позднего карбона и начала перми (рис. 3).

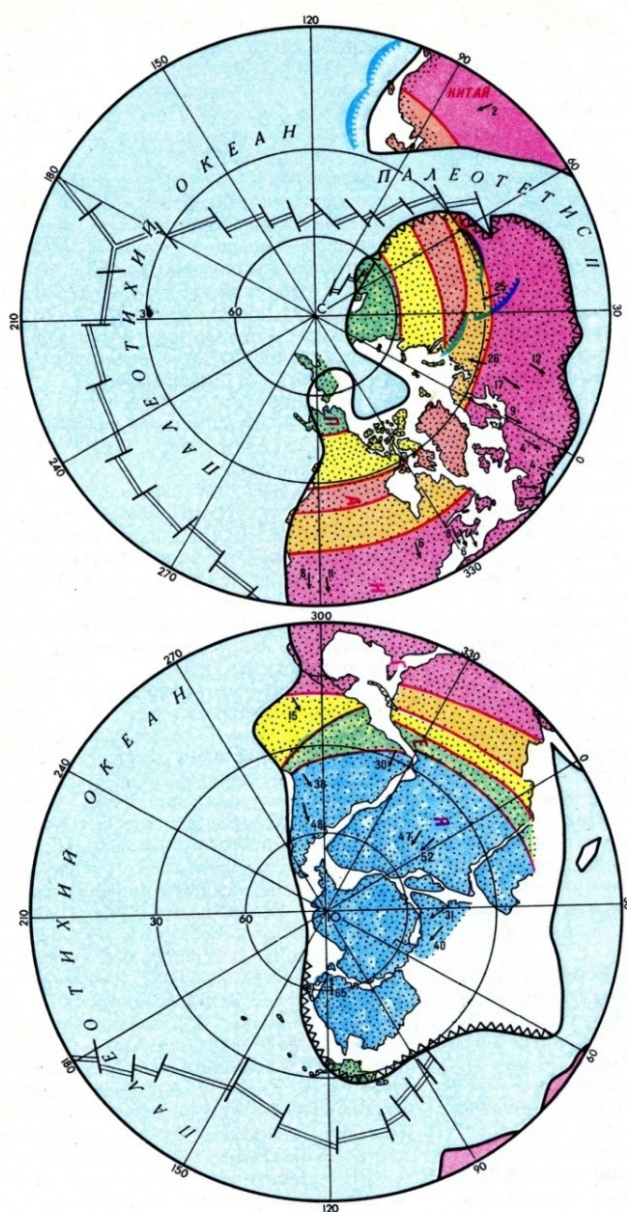


Рис. 3. Палеоклиматическая поясность позднего карбона и начала перми (приводится по: [9]).

Условные обозначения см. на рис. 2

В этот период значительно меньшего поступления тепла из недр Земли, чем в среднем и позднем девоне, как и в настоящее время, обширный ледниковый покров был развит на континенте в районе Южного полюса.

Начиная с мезозоя количество образывающегося вещества в плазменном состоянии, как отмечалось, уже не создавало внутреннее давление, которое превысило бы прочность кровли. Поэтому последняя крупнейшая термоэра (сибирская) охватывала почти весь мезозой и начало кайнозоя и завершилась на рубеже эоцена и олигоцена около 37–38 млн лет назад. На протяжении сибирской термоэры мощность литосферы возрастала, соответственно, снижалась температура на поверхности Земли. Начало следующей за ней гляциоэры — кайнозойской (лавразийской), продолжающейся до сих пор, ознаменовалось появлением первых ледников — сначала в горах Антарктиды, а затем и в горных регионах Северного полушария. В миоцене антарктический ледниковый покров уже имел размеры, близкие к современным [10]. В конце неогена Земля достигла, по Дж. Эндрюсу, «ледникового порога» и установился режим регулярных климатических колебаний [11]. Особенно четко он проявился в четвертичный период в чередовании оледенений и межледниковий примерно одинаковой продолжительности. С точки зрения новой гипотезы образования Земли, график предполагаемого изменения климата, по Дж. Эндрюсу, может быть истолкован следующим образом (рис. 4). В палеогене и неогене происходило прогрессирующее остывание земной поверхности вследствие увеличения мощности литосферы. После достижения четвертичного ледникового порога значительные и кратковременные климатические изменения на поверхности Земли, проявившиеся в многократном чередовании оледенений и межледниковий, стали практически полностью зависеть от количества поступающей на планету солнечной энергии.

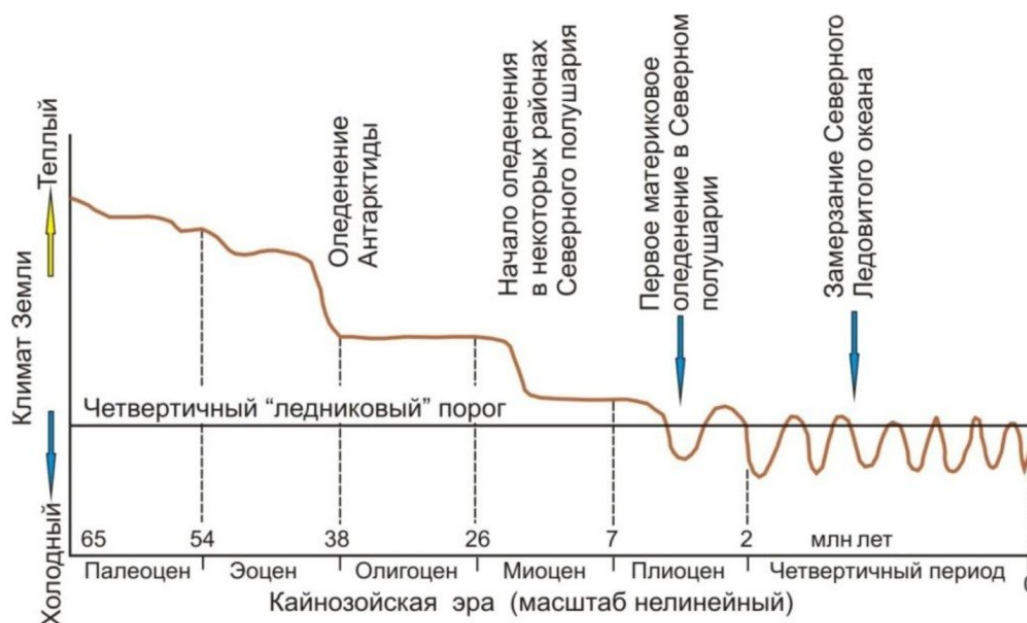


Рис. 4. Предполагаемая тенденция развития климата Земли в третичном и четвертичном периодах, направленная к достижению «ледникового порога». По крайней мере, в течение последних 2 млн лет происходили колебания климата относительно этого порога [11]

Совершенно определенно установлена связь между изменением уровня океана (соответственно, и объемом ледников Земли) и вариациями инсоляции (рис. 5).

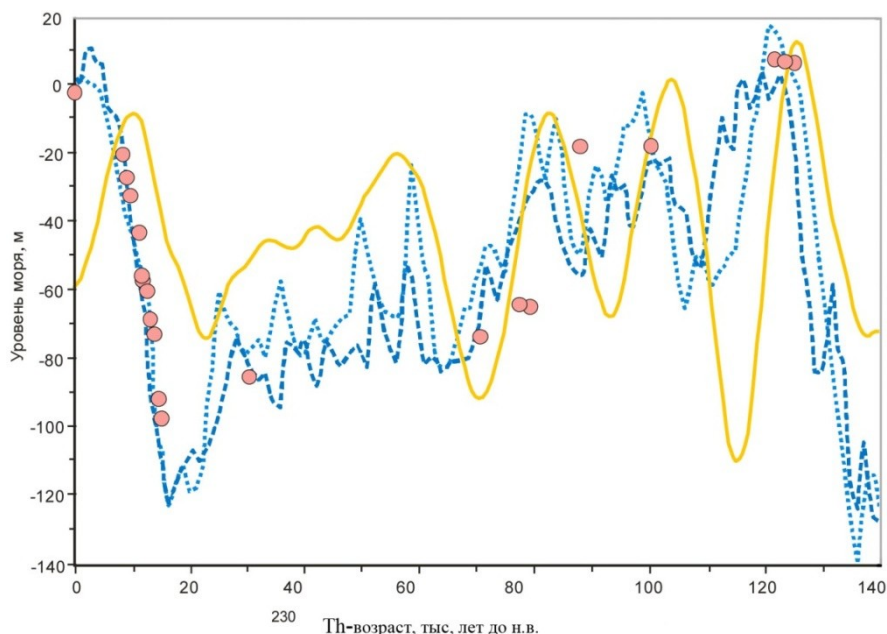


Рис. 5. Изменение уровня Мирового океана и вариации инсоляции [12]: розовые кружки — данные по кораллу *Acropora palmate*; точечная (голубая [13]) и пунктирная (синяя [14]) линии — нормализованные $\delta^{18}O$ кривые, построенные по результатам изучения фораминифер; сплошная желтая линия — летняя инсоляция на 65° с. ш. (приводится по: [15])

Многие исследователи подчеркивают зависимость температуры поверхности Земли от количества в атмосфере парниковых газов вулканического происхождения. В. Е. Хаин, Э. Н. Халилов [16] современное потепление объясняют возрастанием числа извержений вулканов в последние столетия. Однако не менее вероятен некоторый разогрев земной коры в результате извержений и соответствующее ему потепление, которое, судя по тенденции развития эндогенной активности Земли, принципиально не изменит климатическую обстановку в ближайшем будущем. Однако остывание Земли и ухудшение климатической обстановки будет продолжаться.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Большаков В. А.* Новая концепция орбитальной теории палеоклимата. М.: Изд-во МГУ, 2013. 256 с.
2. *Лесовой Ю. И.* К вопросу эволюции вещества Земли // Отечественная геология. 2007. № 2. С. 83–89.
3. *Дубровский М. И.* Происхождение и эволюция вещества Земли с точки зрения новой гипотезы // Тетта. 2010. № 2. С. 4–12.
4. Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 1. С. 179–188.
5. Глубинная нефть: [электронный журнал]. 2013. Т. 1, № 4. С. 157–168.
6. *Чумаков Н. М.* Общая направленность климатических изменений на Земле за последние 3 миллиарда лет // ДАН. 2001. Т. 381, № 5. С. 652–655.
7. *Джон Б.* Ритм, причина и прогноз // Зимы нашей планеты / Б. Джон [и др.]; под ред. Б. Джона; пер. с англ. Л. Р. Серебрянного. М.: Мир, 1982. С. 282–298.
8. *Volcanos, stratospheric an aerosol and a climate of the Earth / M. L. Asaturov [et al.].* L.: Hydrometeoizdat, 1986. 256 p.
9. *Ушаков С. А., Ясаманов Н. А.* Дрейф материков и климаты Земли. М.: Мысль, 1984. 206 с.
10. *Зубаков В. А., Борзенкова И. И.* Палеоклиматы подземного кайнозоя. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 216 с.
11. *Эндрюс Дж.* Современный ледниковый период: кайнозойский // Зимы нашей планеты / Б. Джон [и др.]; под ред. Б. Джона; пер. с англ. Л. Р. Серебрянного. М.: Мир, 1982. С. 220–281.
12. *Bard E., Hamelin B., Fairbanks R. G.* U-Th ages obtained

by spectrometry in corals from Barbados: sea level during the past 130000 years // *Nature*. 1990. Vol. 346. P. 456–458. **13.** *Labeyrie L. D., Duplessy J. C., Blanc P. L.* Variations in mode of formation and temperature of oceanic deep water over the past 125000 years // *Nature*. 1987. Vol. 327. P. 477–482. **14.** *Shackleton N. J.* Oxygen isotopes, ice volume and sea level // *Quat. Sci. Rev.* 1987. Vol. 6. P. 183–190. **15.** *Berger A. L.* Long-term variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements // *Quat. Res.* 1978. Vol. 9. P. 139–167. **16.** *Хаин В. Е., Халилов Э. Н.* Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. М.: Мир, 2009. 520 с.

Сведения об авторе

Евзеров Владимир Яковлевич — доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: yevzerov@geoksc.apatity.ru

Author Affiliation

Vladimir Ya. Yevzerov — Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: yevzerov@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

Евзеров, В. Я. Эволюция климата с позиций новой гипотезы образования Земли / *В. Я. Евзеров* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 1 (9). — С. 16–23.

Reference

Yevzerov Vladimir Ya. Evolution of Climate from the Standpoint of a New Hypothesis of the Earth Formation. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1 (9), pp. 16–23 (In Russ.).

УДК 551.248.2+550.348.436(470.21)

РЫХЛЫЙ ПОКРОВ И НОВЕЙШАЯ ГЕОДИНАМИКА КОЛЬСКОГО ЗАЛИВА (ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ РАБОТ)

В. Я. Евзеров¹, С. Б. Николаева¹, Т. С. Шелехова²

¹ФГБУН Геологического института КНЦ РАН

²ФГБУН Институт геологии КарНЦ РАН

Аннотация

Анализ материалов по геологическому строению и тектонике района Кольского залива Баренцева моря показывает, что эта депрессия сформировалась на пересечении разломов субмеридионального и северо-восточного простирания. Вероятнее всего, она образовалась на рубеже позднего миоцена — плиоцена, когда после регрессивного развития континентальной окраины началось погружение шельфа. Первично-тектоническая депрессия Кольского залива к настоящему времени значительно трансформирована экзогенными процессами. В четвертичное время это было воздействие главным образом ледников. В формировании осадочного покрова залива, наряду с ледниками и их талыми водами, принимали участие морские трансгрессии и современные флювиальные и приливно-отливные процессы. Новейшие гляциоизостатические и собственно тектонические перемещения привели к возникновению напряжений, разрядка которых обусловила высокую сейсмическую активность Кольского залива и его окрестностей.

Ключевые слова:

Кольский залив, Мурманское побережье, рыхлый покров, сейсмическая активность, землетрясения, голоцен, Балтийский щит.

LOOSE COVER AND NEWEST GEODYNAMICS OF THE KOLA BAY (FIRST RESULTS AND PROSPECTS FOR FURTHER RESEARCHES)

Vladimir Ya. Evzerov¹, Svetlana B. Nikolaeva¹, Tatyana S. Shelekhova²

¹Geological Institute of the KSC of the RAS

²Institute of Geology of the Karelian Science Centre of the RAS

Abstract

Analysis of geological structure and tectonics in the area of the Kola Bay of the Barents Sea shows that this depression was formed at the intersection of faults of near-N-S and N-E strike. Most likely it was formed at the turn of the Late Miocene — Pliocene, when after the regression of the continental margin, the shelf immersion began. Primary tectonic depression of the Kola Bay was significantly transformed by exogenous processes by now. In the Quaternary, it was mainly the impact of glaciers. Marine transgressions and modern fluvial and tidal processes participated in the formation of the Bay sedimentary cover along with glaciers and their meltwater. The loose cover partially filling the bay depression has been studied lithologically within the southern limb. The sediments include slope deposits, the moraine of Valdai glaciation, glacial-marine and marine sediments. Glacial-marine sediments represented by sands of different size formed during marine transgression caused by the increase in the ice load during the Young Drias. Marine sediments accumulated, probably, during the Holocene transgression, caused by the World Ocean level rise. The section is crowned by marine sands of small thickness formed during the Holocene regression. Currently siltstone and clay

sediments accumulate at the bottom of the Bay in depressions. The latest glacioisostatic and the proper tectonic movements have led to the emergence of stresses, which relief caused high seismic activity of the Kola Bay and the surrounding area.

Keywords:

Kola Bay, Murmansk coast, loose cover, seismic activity, paleoearthquakes, Holocene, Baltic shield.



Кольский залив Баренцева моря расположен на мурманском побережье Кольского п-ова и по геоморфологической классификации относится к краевым бассейнам фьордового типа. Его восточный берег скалистый обрывистый, западный — относительно пологий. Одной из характерных особенностей акватории залива является его форма,

которую в соответствии с изгибами подразделяют на три участка: I — северное (субмеридиональное) колено, II — среднее (с ориентацией СВ-ЮЗ) и III — южное (субмеридиональное) колена (рис. 1). Общая протяженность залива составляет 58,7 км, а глубины у входа составляют 200–300 м. Ширина залива постепенно уменьшается от 3–3,5 км в северном колене до 1,5–2,5 в среднем и 1,0–1,5 км в южном.



Рис. 1. Схема новейших разломов и палеосейсмических проявлений в районе Кольского фиорда:
 1 — разрывные нарушения (линеаменты); 2 — активные разломы; 3 — палеосейсмодиформации и их возраст по ¹⁴C; 4 — границы частей Кольского залива и их номера (римскими цифрами);
 5 — участок с изученными осадками озер

История исследований геологического строения и современное состояние изученности Кольского залива подробно рассмотрены в статье Э. В. Шпилова и Е. А. Ковальчук [1]. Залив, судя по плановому рисунку, сформировался по системе разломов субмеридионального и северо-восточного простирания. Рыхлый покров, частично заполняющий депрессию залива, изучен литологически и только в пределах южного колена. Здесь на коренных отложениях, по данным [1], залегают ледниковые образования (комплекс I из трех слоев — 1, 2а и 2б) (рис. 2).

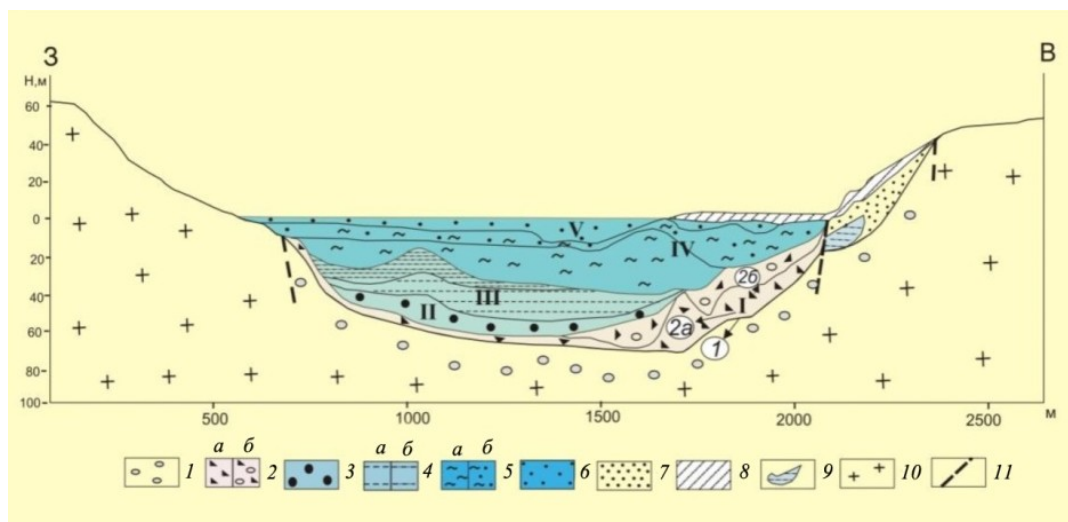


Рис. 2. Разрез отложений южного колена Кольского фиорда по данным инженерно-геологического бурения (по [1] с дополнениями авторов).

Ледниковые отложения, комплекс I (морена): 1 — с преобладанием валунов и песчаным заполнителем, 2а — щебенистые отложения с песчаным заполнителем, 2б — гравийные отложения с галькой, щебнем; комплекс II (ледниково-морские отложения): 3 — пески; комплекс III: 4а — алевриты; 4б — алевриты с прослоями илов; комплекс IV (морские отложения): 5а и б — илы супесчаные и суглинистые соответственно; комплекс V: 6 — морские пески, 7 — аллювиальные пески, 8 — техногенные отложения, 9 — линза алеврита с частыми прослоями илов, 10 — породы кристаллического фундамента, 11 — предполагаемые разломы

Авторы иначе трактуют генезис осадков. Слой 1 из данного комплекса, лежащий на кристаллических породах, по литологическим признакам — присутствию в составе 10–15 % крупного щебня и дресвы и слишком высокому содержанию валунов (50–55 %) — ближе к склоновым образованиям, претерпевшим переработку в водной среде, чем к морене. «Щебенистый» слой 2а имеет максимальную мощность у восточного борта и выклинивается к западу. Это — и по условиям залегания, и по составу — типичные склоновые отложения. Только слой 2б комплекса I, судя по литологической характеристике, близок к морене покровного оледенения. Е. А. Ковальчук и Э. В. Шпилов предположили, что морена сформирована поздневалдайским ледниковым покровом [1]. Сделанное предположение не лишено оснований, поскольку ориентировка колен близка к направлениям перемещения ледниковых масс в период поздневалдайского оледенения. Это означает, что потоки льда продвигались вдоль колен депрессии и, соответственно, экзарационное воздействие ледника на породы ложа было весьма значительным, подобно тому, как это имеет место в Восточной Антарктиде [2]. Однако по мере приближения к краевой зоне ледника, выделенной в работе [3], интенсивность экзарации убывала в северном направлении. Если в южном колене ледник

ассимилировал почти все более древние осадки, то в северном колене залива, особенно в его северной части, они могли сохраниться с существенно большей полнотой. Косвенным свидетельством этого является мощность рыхлого покрова, которая в южном колене составляет порядка 65–70 м, а на выходе из северного колена превышает 200 м [1]. Следует отметить, что разрез отложений северного колена не изучен до сих пор. В южном колене комплекс I покрывают ледниково-морские осадки, представленные песками различной крупности с часто наблюдающейся косой слоистостью. Они могли сформироваться только во время морской трансгрессии, вызванной возрастанием ледниковой нагрузки в период позднего дриаса [4].

На морене залегают алевроиты и алевроиты с прослоями илов (комплекс III, 4a и 4b на рис. 2). Поскольку алевроиты не характерны для ледниково-морских образований, логичнее рассматривать их как морские осадки. Вверх по разрезу алевроиты сменяются морскими же суглинистыми и супесчаными илами с обломками ракушки и редкими включениями гравия, максимальная мощность которых достигает 36 м [1]. Морские отложения накопились в период голоценовой трансгрессии, вызванной повышением уровня Мирового океана [5]. Венчают разрез морские пески небольшой мощности [1], сформировавшиеся в период голоценовой регрессии при гляциоизостатическом поднятии региона. В настоящее время на дне залива во впадинах отлагаются алевроитовые и глинистые осадки [6].

Ригель, обнаруженный в устье Кольского залива [7], является, по-видимому, генетическим аналогом ригелей в заливах Шпицбергена, возникших в заключительную стадию (позднеюрмскую?) деградации покровного оледенения [8]. Подобные ледниковые гряды обнаружены и на суше. Это напорно-насыпные морены поздневалдайского оледенения, перегораживающие с юга Вудъяврскую и с востока Сейдозерскую котловины в Хибинском и Ловозерском горных массивах соответственно [9, 10]. Однако ригель в Кольском заливе сформировался в одну из стадий деградации более раннего оледенения, во время которой ледниковый покров вторгнулся в регион с севера. Материалы, свидетельствующие о функционировании такого ледника, имеются в работах А. А. Никонова [11] и П. Ёханссена [12].

Из изложенного следует, что пока нет данных, которые позволили бы установить конкретное время образования депрессии залива. Авторам наиболее приближенной к действительности представляется гипотеза, согласно которой формирование котловины произошло тогда же, когда окончательно оформился контур Кольского п-ова вследствие перехода от регрессивного развития континентальной окраины к трансгрессивному шельфовому погружению на рубеже позднего миоцена-плиоцена [13].

Первично-тектоническая депрессия Кольского залива к настоящему времени значительно трансформирована экзогенными процессами. В четвертичное время это было, главным образом, воздействие ледников.

Признаки активизации движений в голоцене установлены по разлому, ограничивающему северное колено залива с востока. Этот разлом прослеживается и южнее в районе озер Домашнего, Щукозера и далее к югу. Его местоположение показано на рис. 3 в работе [14], в которой приведены конкретные признаки того, что перемещение по разлому имело место после трансгрессии, вызванной увеличением ледниковой нагрузки на континент в период похолодания позднего дриаса. Кроме того, предполагается, что в голоцене активизировались и разломы северо-восточного простирания. Вероятным подтверждением этого является прямолинейное, протяженное и достаточно глубокое продолжение реки Туломы в пределах Кольского залива.

О новейшей активизации разломов свидетельствуют аномальная орографическая раздробленность кристаллических пород, особенно на северо-западном борту Кольского залива, отражающая мелкблоковое строение, а также древние и современные землетрясения. Резкая расчлененность рельефа с перепадами высот в десятки метров и более связана с повышенной, по крайней мере на порядок, трещиноватостью скальных пород в прибрежной полосе и наличием здесь разрывов молодых, более склонных к смещениям, особенно при внешних воздействиях.

Следы древних землетрясений (палеосейсмодеформаций) развиты в пределах 65-километровой зоны, которая примыкает к Кольскому заливу — одному из сейсмоактивных узлов на побережье Мурмана [15, 16]. Они выявлены как в скальном субстрате, так и в рыхлых осадках. В рельефе это свежие трещины с остроугольными обломками, рвы расседания, в заложении которых практически не наблюдается воздействия экзогенных процессов, зоны повышенной трещиноватости и дробления, отвесные уступы, с крупными обвалами в основании. Вдоль западного борта Кольского залива к настоящему времени, по меньшей мере в четырех пунктах, известны разрезы рыхлых отложений с сейсмически индуцированными структурами, возникшими в результате сильных ($I \geq VIII$) сейсмических воздействий. Их возраст укладывается в интервал 7,8–11,0 тыс. лет назад (тыс. л. н.) [16, 17]. В рыхлых песчано-глинистых отложениях сейсмичность представлена различными типами деформаций, в том числе и проявлениями вертикально направленных воздействий (рис. 3). Это можно рассматривать как признак подъема песчаного материала в вышележащие отложения, т. е. спонтанного разжижения песков, как это часто случается при сильных сейсмических сотрясениях [18].



Рис. 3. Пример сейсмически индуцированных структур в песчано-алевритистых осадках Сайда-губы (западный борт Кольского залива):

a — столбчатые; *б, в* — конволюции; *г* — явления разжижения, нарушающие горизонтальную слоистость песков

Возраст образования палеосейсмодеформаций указывает на то, что сеймотектоническая активность территории проявлялась на протяжении почти всего голоцена. Наибольшее количество событий относится к периоду последних стадий позднеледниковья — начала голоцена (11–9 тыс. л. н.) и свидетельствует о повышенной сейсмоактивности региона в период дегляциации и промежутки времени, последовавший за исчезновением последнего оледенения.

Из исторических землетрясений в Мурманской зоне, как выяснилось при тщательном рассмотрении первичных сообщений, повышенной интенсивностью отличались события 1772 г. ($M = 4,6$, $I \sim 6$) и 1873 г. с эпицентрами в районе Колы ($M = 4,1$, $I \sim 6$) [19, 20]. Из более поздних, инструментально зарегистрированных, известны события 1968 г. ($M = 4,2 \pm 0,5$, $I = 4 \pm 0,5$) и 1990 г. с эпицентрами близ Колы и в междуречье рек Колы и Медвежьей ($M = 4$) [20].

Анализ современной сейсмичности, по данным Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН, отражает низкий уровень сейсмической энергии (не более 1012 Дж) за период 1902–2015 гг., что, скорее всего, связано с тем, что в тектоническом режиме в последнее тысячелетие и настоящее время ведущая роль перешла от вертикально направленных сил гляциоизостазии к горизонтально сжимающим напряжениям.

Новейшие перемещения по разломам носили характер сдвигов небольшой амплитуды и определены по геоморфологическим данным. Сдвиг по субмеридиональному разлому является, очевидно, одним из тех новейших сдвигов указанной ориентировки, о которых сообщил Э. А. Шипилов [1]. При перемещении блоков в районе залива, помимо горизонтальной, была, вероятно, и вертикальная составляющая. Однако конкретные данные имеются только по блоку, ограничивающему северное колено Кольского залива с запада. В пределах этого блока, в районе г. Полярного, Дж. Корнером, В. В. Колькой, В. Я. Евзеровым и др. исследованы отложения девяти озерных котловин, вследствие гляциоизостатического поднятия территории изолировавшихся от моря [21]. Кроме того, нами изучены отложения одной из озерных котловин (озеро 10), отделившейся от моря при поднятии (рис. 4). Порог стока из этой котловины расположен на высоте 51,5 м над ур. м. Для сопоставления представляют интерес озера 1 и 2, радиоуглеродный возраст изоляции которых от моря составляет 9100 ± 55 и 9165 ± 65 лет до настоящего времени (н. в.) соответственно. Порог стока из озера 1 находится на отметке около 57 м, из озера 2 — 48,5 м.

В озерной котловине 10, расположенной в 7,5 км к югу-юго-западу от озер 1 и 2, вскрыты разрезы, имеющие двучленное строение и состоящие из алевроитов с включениями щебня и гальки, сменяющиеся вверх по разрезу гиттией (рис. 4, б). Диатомовый анализ образца алевроитов в нижней части разреза (глубина 540–538 см) указывает на развитие морской диатомовой флоры, состоящей на 60 % из поли- и мезогалобов и на 24 % — галофилов. Пресноводные индифференты составили 16,4 %. Такой состав позволяет сделать вывод о формировании диатомового комплекса в морских условиях. Основными доминантами на данной глубине являлись полигалобы *Grammatophora angulosa var. islandica* и мезогалобы *Cocconeis scutellum*, *Diploneis subcincta*, *Diploneis interrupta*. Галофильный комплекс более разнообразен, среди него главными доминантами выступали *Rhoico-sphaenia curvata*, *Diploneis smithi*. Пресноводная флора представлена в большинстве своем многочисленными единичными створками разных родов: *Amphora*, *Cymbella*, *Eunotia*, *Fragilaria*, *Gomphonema*,

Navicula, *Nitzschia*. Выше по разрезу, в верхней части толщи алевроитов (глубина 494–492 см), произошло достаточно заметное снижение содержаний как морских поли- и мезогалобов (с 60 до 38 %), так и галофилов (с 24 до 13,6 %). Соответственно возросла доля пресноводных диатомей с 16,4 до 48 %. Эти осадки следует считать переходными от морских к пресноводным, то есть солонатоводными. Кроме этого, в данном комплексе произошла смена полигалобов: ранее доминирующие *Grammatophora angulosa* var. *islandica* были вытеснены *Rhabdometa minutum*, среди мезогалобов господствовали *Cocconeis verrucosa*, *Diploneis subcincta*; галофилов — *Cyclotella kuetzingiana* var. *radiosa*, *Fragilaria virescens* var. *subsalina*. Все остальные виды представлены единичными створками, а разнообразные пресноводные — видами родов *Symbella*, *Eucoconeis*, *Pinnularia*, *Neidium*, *Navicula*, *Frustulia*.

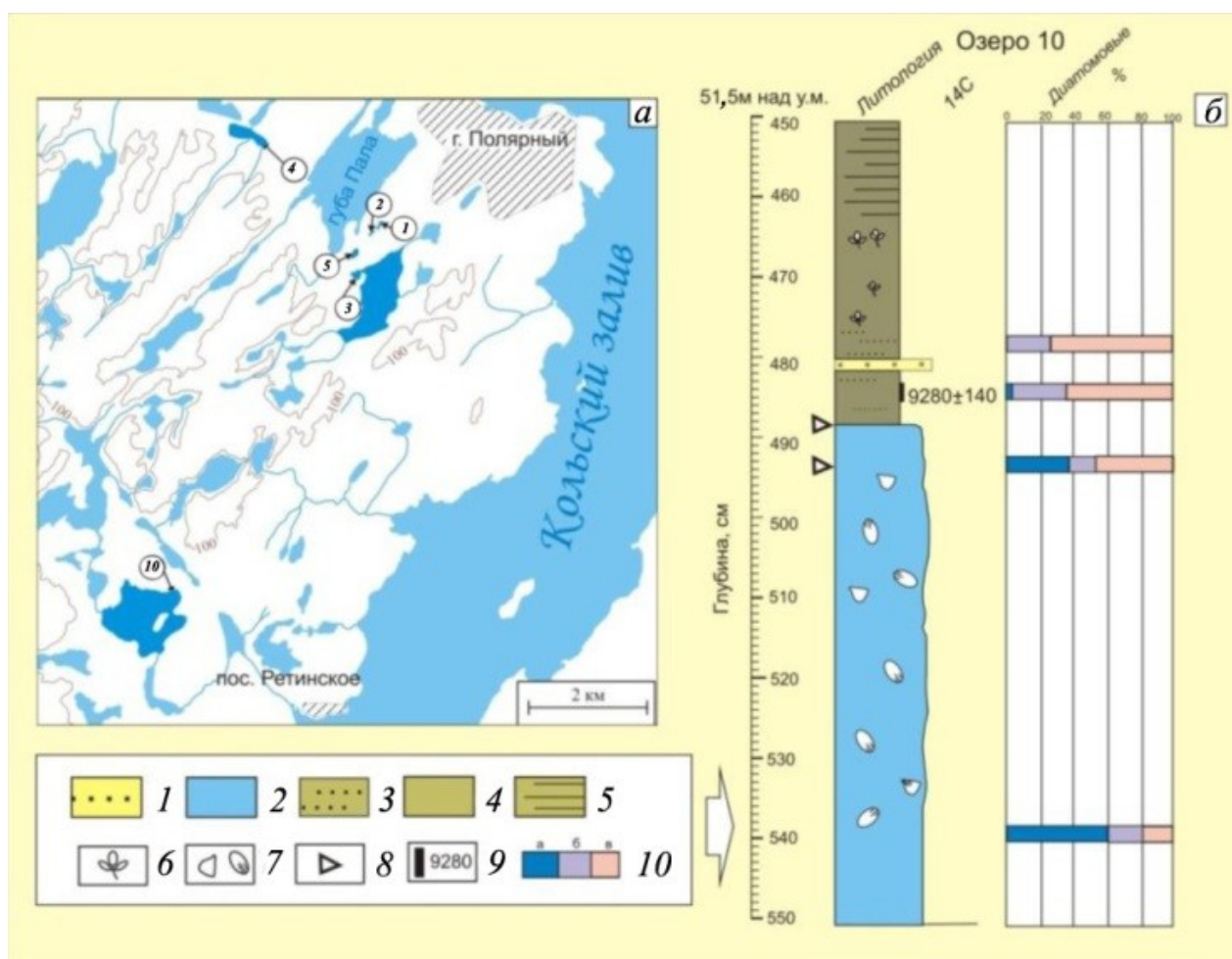


Рис. 4. Схема расположения озерных котловин, изолировавшихся от моря в голоцене (а) и разрез по скважине 10 (б):

1 — песок; 2 — алевроит; 3–5 — гиттия: 3 — опесчаненная, 4 — неслоистая, 5 — слоистая; б — остатки растений; 7 — щебень, галька; 8 — переходная зона от морских к пресноводным; 9 — место отбора пробы на ^{14}C и дата; 9 — диатомовые, галобность (а — морские, б — галофилы, в — пресноводные)

Образцы, взятые из верхней части разреза, состоящей из опесчаненной и однородной гиттии, представляют пресноводную фацию осадков. Это подтверждается господством пресноводных диатомей, хотя в образце, отобранном с глубины 486–484 см, достаточно высоко

содержание галофилов (30,8 %) и минимальное, в виде единичных экземпляров (2,8 %) — мезо- и полигалобов. В опесчаненной гиттии среди галофилов выделяются *Fragilaria pinnata*, *Fragilaria virescens* var. *subsalina*, *Cyclotella kuetzingiana*, *C. kuetzingiana* var. *schumanii*, *C. kuetzingiana* var. *radiosa*, *Navicula radiosa*, *N. tenella*, а в однородной гиттии к ним присоединяются различные виды рода *Nitzschia*, более характерные для мелководий и почв.

Данные диатомового анализа и радиоуглеродный возраст свидетельствуют об изоляции этой озерной котловины от моря еще в период накопления верхней части алевроитов, то есть несколько ранее даты 9280 ± 140 (^{14}C) лет до н. в.

Градиент гляциоизостатического поднятия, возрастающего в южном направлении, по данным российских и норвежских специалистов [21, 22], за последние 9 тыс. лет в районе Кольского залива превышал 0,6 м на 1 км. Судя этому градиенту, при сравнении с высотами озер 1 и 2 оказывается, что озеро 10 под влиянием только гляциоизостатического поднятия должно было бы располагаться на более высоких отметках, чем теперь. Причем высоты расположения озера 10 должны превышать расчетные, поскольку, согласно датировке, изоляция озера 10 произошла раньше, чем котловин озер 1 и 2, а величина и градиент поднятия по мере удревания возрастают. Это позволяет сделать вывод о том, что при новейшем перемещении блока проявилась не только гляциоизостатическая, но и собственно тектоническая составляющая, приведшая к его небольшому перекосу. Проблема влияния собственно тектонической составляющей на положение изобаз гляциоизостатического поднятия в регионе в целом требует пристального внимания и детального изучения.

Полученные результаты показывают, что структура Кольского залива Баренцева моря не осталась «законсервированной» и в голоцене, а реагировала как на гляциоизостатические, так и на тектонические (сеймотектонические) события, запечатленные в виде активизации разломов, сейсмонарушений скального субстрата и рыхлых отложений. В ближайшем будущем необходимо более полно обследовать побережье залива с целью обнаружения участков распространения палеосейсмодеформаций и для возможного их датирования изучить отложения в котловинах расположенных поблизости озер. Это позволит в конечном итоге, датируя нарушения залегания осадков, определить периодичность проявления сильных землетрясений, которая вместе с выделением сейсмоактивных зон имеет существенное экологическое значение. Весьма важным и необходимым представляется и комплексное изучение отложений большой мощности в устьевой части залива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шипилов Э. В., Ковальчук Е. А. История исследований геологического строения и современное состояние его изученности // Кольский залив: освоение и рациональное природопользование. М.: Наука, 2009. С. 46–52.
2. Евтеев С. А. Геологическая деятельность ледникового покрова Восточной Антарктиды. М.: Наука, 1964. 149 с.
3. Евзеров В. Я., Самойлович Ю. Г. Реконструкция северо-восточной краевой области скандинавского ледникового покрова в поздневалдайское время // Геоморфология. 1998. № 4. С. 65–70.
4. Евзеров В. Я. Позднеплейстоцен-голоценовые трансгрессии на побережьях Мурмана и Белого моря // Геоморфология. 2012. № 4. С. 53–64.
5. Кольский залив: океанография, биология, экосистемы, поллютанты / Коллектив авторов. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 265 с.
6. Shackleton N. J. Oxygen isotopes, ice volume and sea level // Quaternary Sci. Rev. 1987. No. 6. P. 183–190.
7. Матишов Д. Г., Матишов Г. Г., Риссанен Х. Радиоактивное загрязнение Кольского залива Баренцева моря // ДАН. 1996. Т. 351, № 4. С. 571–573.
8. Каплин П. А. Фиордовые побережья Советского Союза. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 188 с.
9. Матишов Г. Г. Геоморфология дна и некоторые особенности гляциального морфогенеза подводной окраины Западного Шпицбергена //

Океанология. 1978. Т. XVIII, вып. 2. С. 255–262. **10. Евзеров В. Я.** Краевые образования покровного и горного оледенений в районе Сейдозерской котловины // Геоморфология. 2010. № 2. С. 55–59. **11. Евзеров В. Я., Николаева С. Б.** Покровные и горные оледенения позднего плейстоцена и голоцена в районе Хибинских гор // Геоморфология. 2010. № 1. С. 26–36. **12. Никонов А. А.** О стратиграфии морен и оледенениях в западной части Кольского полуострова // Вопросы геоморфологии и геологии осадочного покрова Кольского полуострова. Апатиты: КФАН СССР, 1960. С. 121–135. **13. Johansson P.** The deglaciation in the eastern part of Weichselian ice divide in Finnish Lapland: Academic dissertation / Geological Survey of Finland. Rovaniemi. 1995. 93 p. **14.** Палеогеографические обстановки и тектонические деформации Баренцевоморской континентальной окраины / Э. В. Шипилов [и др.] // ДАН. 2006. Т. 407, № 3. С. 378–383. **15. Евзеров В. Я.** Четвертичный период в Кольском регионе (вопросы стратиграфии и тектоники // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 1 (24). С. 5–14. **16. Николаева С. Б.** Следы разрушительных землетрясений в окрестностях города Мурманска (по историческим и палеосейсмогеологическим данным) // Вулканология и сейсмология. 2008. № 3. С. 52–61. **17. Николаева С. Б.** Свидетельства сейсмических событий на побережье Мурманска в позднеледниковье и голоцене (северо-восток Балтийского щита) // Изв. РГО. 2013. Т. 145, вып. 4. С. 53–65. **18. Никонов А. А., Николаева С. Б.** Линеамент Карпинского на границе Фенноскандинавского кристаллического щита и Баренцевой плиты как активная тектоническая и сейсмическая зона // Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа: материалы Междунар. науч. конф. (Мурманск, 6–8 ноября 2014 г.). М.: ГЕОС, 2014. Вып. 12. С. 232–237. **19. Obermeier S. F., Olson S. M., Green R. A.** Field occurrences of liquefaction-induced features: a primer for engineering geologic analysis of paleoseismic shaking // Engineering Geology. 2005. Vol. 76. P. 209–234. **20. Мушкетов И. В., Орлов А. П.** Каталог землетрясений Российской империи // Зап. Рус. геогр. о-ва. СПб., 1893. Т. 26. **21. Годзиковская А. А., Асминг В. Э., Виноградов Ю. А.** Ретроспективный анализ первичных материалов о сейсмических событиях, зарегистрированных на Кольском полуострове и прилегающей территории в XX веке. М.: Изд-во ГС РАН, 2010. 132 с. **22.** Postglacial relative sea-level change and stratigraphy of raised coastal basins on Kola Peninsula, Northwest Russia / G. D. Corner [et al.] // Global and Planetary Change. 2001. Vol. 31(1–4). P. 153–175. **23. Romundset A, Bondevik S, Bennike O.** Postglacial uplift and relative sea level changes in Finnmark, Northern Norway // Quaternary Sci. Rev. 2011. Vol. 30. P. 2398–2421.

Сведения об авторах

Евзеров Владимир Яковлевич — доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: yevzerov@geoksc.apatity.ru

Николаева Светлана Борисовна — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: nikolaeva@geoksc.apatity.ru

Шелехова Татьяна Станиславовна — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии Карельского научного центра РАН

E-mail: shelekh@krc.karelia.ru

Author Affiliation

Vladimir Ya. Evzerov — Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: yevzerov@geoksc.apatity.ru

Svetlana B. Nikolaeva — PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: nikolaeva@geoksc.apatity.ru

Tatyana S. Shelekhova — PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Institute of Geology of the Karelian Science Centre of the RAS

E-mail: shelekh@krc.karelia.ru

Библиографическое описание статьи

Евзеров, В. Я. Рыхлый покров и новейшая геодинамика Кольского залива (первые результаты и перспективы дальнейших работ) / *В. Я. Евзеров, С. Б. Николаева, Т. С. Шелехова* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 1 (9). — С. 24–33.

Reference

Evzerov Vladimir Ya., Nikolaeva Svetlana B., Shelekhova Tatyana S. Loose Cover and Newest Geodynamics of the Kola Bay (First Results and Prospects for Further Researches). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1 (9), pp. 24–33 (In Russ.).

УДК 551.24 + 530.1 + 539.2

КВАНТОВАНИЕ ЛУННОЙ ГРАВИТАЦИИ (ЭНЕРГИИ ПРИЛИВНОЙ ВОЛНЫ) В ЗЕМНОЙ ОБОЛОЧКЕ И «КВАНТОВАЯ» ОСНОВА СИЛЫ УПРУГОСТИ*

В. Л. Ильченко

ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

Аннотация

Для оценки упругой деформации вещества земной коры в области приливного возмущения в «квантовом» масштабе было использовано отношение превышения в волне твердого прилива (h) к глубине проникновения энергии лунной гравитации (H) во внешнюю оболочку Земли ($\Delta h = h/H$). Сделан вывод о том, что приливная волна — это итог гравитационного возмущения атомов в ее составе, реализованный в упругом растяжении их электронных оболочек: $\Delta h_a \approx 10^{-17}$ м; это число только на порядок больше амплитуды гравитационной волны (10^{-18} м), измеренной 14.09.2015 в США на лазерном интерферометре Advanced LIGO.

Ключевые слова:

геодинамика, волны (приливная, стоячая и солитоны), тектоническое расслоение, принцип ЭГМ, квантование, упругая деформация, электронная оболочка атома.

QUANTIZATION OF LUNAR GRAVITY (TIDAL WAVES ENERGY) IN THE EARTH SHELL AND "QUANTUM" BASIS OF ELASTIC FORCE

Vadim L. Il'chenko

Geological Institute of the KSC of the RAS

Abstract

To evaluate the elastic deformation of the Earth crust material in zone of tidal perturbation at "quantum" scale the ratio of the solid tidal wave excess (h) to depth of the lunar gravity energy penetration (H) into the Earth outer shell ($\Delta h = h/H$) has been used. It was concluded that the tidal wave is a sum of gravitational perturbations of all atoms in its structure, implemented in elastic stretching of their electron shells: $\Delta h_a \approx 10^{-17}$ m; this number is only an order of magnitude larger than the gravitational wave amplitude (10^{-18} m), measured by laser interferometer Advanced LIGO at 14 Sept 2015 in the USA.

Keywords:

geodynamics, waves (tidal, standing and solitons), tectonic layering, the principle of the EGM, the quantization, the elastic deformation, the electron shell of atom.



Введение

Комфортные условия для образования месторождений полезных ископаемых (транзит и концентрация вещества) в литосфере создаются геодинамическими процессами. Разведка запасов и добыча минерального сырья сопряжены с проведением горных работ, где риск прямо зависит от напряженного состояния пород. Поле напряжений контролируют явления гравитационной природы — солнечно-лунные приливы [1], описываемые фундаментальной теорией. Строгая теория гравитации должна учитывать

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №14-05-00443.

влияние сил тяготения на тела и влияние этих тел на силы тяготения, а также квантовый характер частиц и полей. До сих пор не удалось убедительным образом объединить результаты квантовой теории с теорией гравитации [2]. Одна из причин неудачи этого объединения — неприменимость законов классической физики к элементарным частицам, «управляемым» квантовой механикой; законы также неспособны оказывать какое-то влияние на макрообъекты. Необходимость объединения этих теорий вызвана принципом соответствия Бора: всякая новая, более общая теория является развитием классической, не отвергает ее полностью, а включает в себя классическую, указывая границы ее применимости.

Поиск пути объединения теорий (гравитационной и квантовой) затруднен слабостью гравитационных волн, из-за чего их нельзя обнаружить современными приборами [3]. При этом не прекращаются работы в разных «нетрадиционных» направлениях, наиболее перспективным среди которых выглядит «Ритмодинамика» Ю. Иванова [4], сосредоточенная на исследовании волновых свойств материи; здесь элементарные частицы (атом, электрон и т. п.) в кристаллах и иных объектах рассматриваются как осцилляторы, самоорганизованные в системы (пакеты) *стоячих волн*, которые обеспечивают, в т. ч., прочность межатомных связей. Важнейшее достижение «Ритмодинамики» — открытие эффекта сжатия стоячих волн (ССВ) [4] (реакция на изменение динамических условий в волновой среде).

Приливная волна (рис. 1, а) по свойствам: компактная форма, долгий срок жизни, внешний источник энергии — напоминает солитон. Лунный прилив на Земле — пара волн-антиподов на противоположных ее сторонах, что делает это явление весьма схожим с двойным солитоном (рис. 1, б, в) — *бризером* (англ. breath — дыхание). Бризер и внешне выглядит как волна, внутри которой действительно пульсирует *стоячая волна* сжатий и разрежений среды [5]. Луна и область твердого прилива на Земле образуют «гравитационный диполь» [6], благодаря чему приливная волна вечно мигрирует в оболочке Земли (по мере ее вращения). Солитоны проявляют корпускулярно-волновой дуализм [5], подтверждающий их «родство» с микроскопическими (квантовыми) объектами (протон, электрон и др.). Поскольку приливная волна — временная область возмущений, ее следует считать «квазичастицей» (как фонон, магنون и т. п. [7]); но, в отличие от прочих, приливный солитон отличается «бесконечным сроком жизни», что превращает его в «суперсолитон».

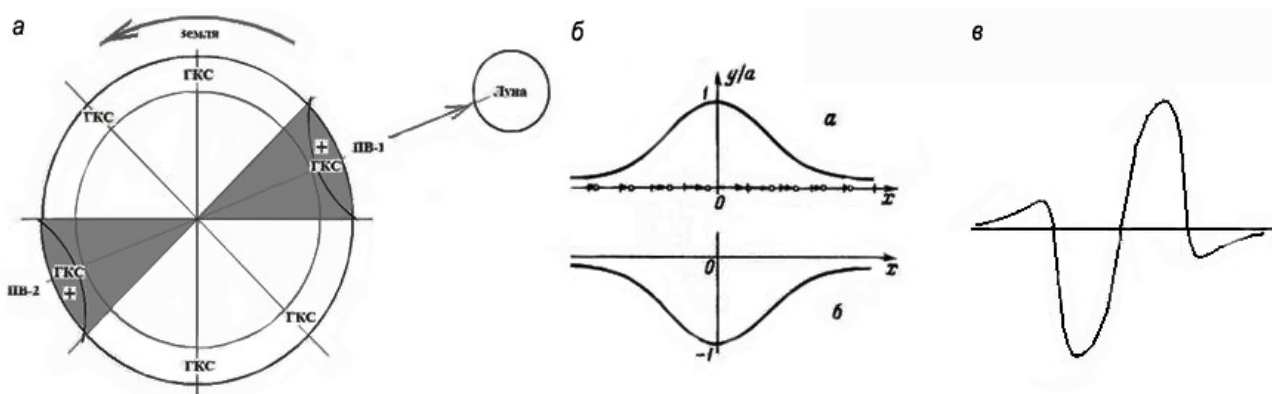


Рис. 1. Сходство приливных волн и солитонов:

- а — пара приливных волн-антиподов на Земле (серый цвет); б — солитоны Френкеля — Конторовой [5];
в — бризер (дублет) — пара «солитон — антисолитон» [9]

Солитоны (нелинейные объекты) описываются нелинейными уравнениями, и, согласно источнику [8], «...применение нелинейных зависимостей приводит к математическим трудностям при решении практических задач механики горных пород». Ниже показан способ решения некоторых нелинейных практических задач без особых математических трудностей.

Как уже было сказано, приливные волны, которые очень похожи на нелинейные объекты — солитоны, играют важную роль в геодинамике. Например, важность состоит в том, что наложение «приливо-волновой нелинейности» на линейные (вполне предсказуемые) геодинамические процессы ведет к тому, что процессы развиваются «нелинейно» и, следовательно, непредсказуемо (землетрясения и т. п.).

Механизм тектонического расслоения

Приливную волну в земной оболочке (твердый прилив) вызывает притяжение Луны, снижающее гравитационный потенциал Земли вдоль ее радиуса (вертикальная компонента поля напряжений в геомеханике — ось Z), входящего в состав «силовой линии», соединяющей центры планетных масс; т. е. эта силовая линия включает вертикальные компоненты ($\sigma_{z\text{Земли}}$ и $\sigma_{z\text{Луны}}$) полей напряжений планет. Ослабление вертикальной компоненты на «гребне» приливной волны ($\Delta\sigma_{z\text{Земли}} = \sigma_{z\text{Земли}} - \sigma_{z\text{Луны}}$) создает эффект растяжения пород (возможно, с раскрытием трещин), превращая «порodный столб» [10] вдоль силовой линии в натянутую «звучащую струну» с динамическими условиями **стоячей волны** («след бризера»), чье звучание — из-за «отключения» от источника энергии («уход» Луны) — вынуждено перейти в режим затухания.

Затухание стоячей волны в натянутой струне протекает в шаговом ритме, где каждый шаг начинается с появления в середине струны (пучность стоячей волны) неподвижной узловой точки («пучность деформации» [11]), которая делит прежнюю волну на пару полуволен (мод), по закону: $\lambda_n = \lambda/2^n$ (λ — длина струны; λ_n — длина моды; n — ее порядковый номер, $n = 0, 1, 2, \dots$ целые числа); последовательность мод образует геометрическую прогрессию [12].

Затухание колебаний в горном массиве принципиально не отличается от затухания звука в натянутой струне. Затухание стоячей волны происходит в шаговом ритме; каждый шаг приводит к удвоению количества узлов и мод, длина которых всякий раз сокращается вдвое (рис. 2, а). Период «звучания» каждой моды (как и при затухании звука в натянутой струне) ограничен появлением новых узловых точек, куда «отжимается» часть упругих напряжений из колеблющихся пучностей. В итоге каждый узел со временем превращается в точечный концентратор избыточно высоких напряжений. Этот механизм применен в расчете граничных параметров модели (рис. 2, б) по формуле $M_n = M/2^n$ (M_n — размер моды (мощность элемента расслоения); M — мощность земной коры Печенгского блока (ЗКПБ), $M_{\text{ЗКПБ}} = 42 \pm 2$ км; n — номер моды (табл. 1).

Таблица 1

Граничные параметры модели расслоения ЗКПБ

Номер моды	Мощность, км	Номер моды	Мощность, км
M_0	42 ± 2	M_5	$1,312 \pm 0,062$
M_1	21 ± 1	M_6	$0,656 \pm 0,031$
M_2	$10,5 \pm 0,5$	M_7	$0,328 \pm 0,015$
M_3	$5,25 \pm 0,25$	M_8	$0,164 \pm 0,007$
M_4	$2,625 \pm 0,125$	M_9	$0,082 \pm 0,003$

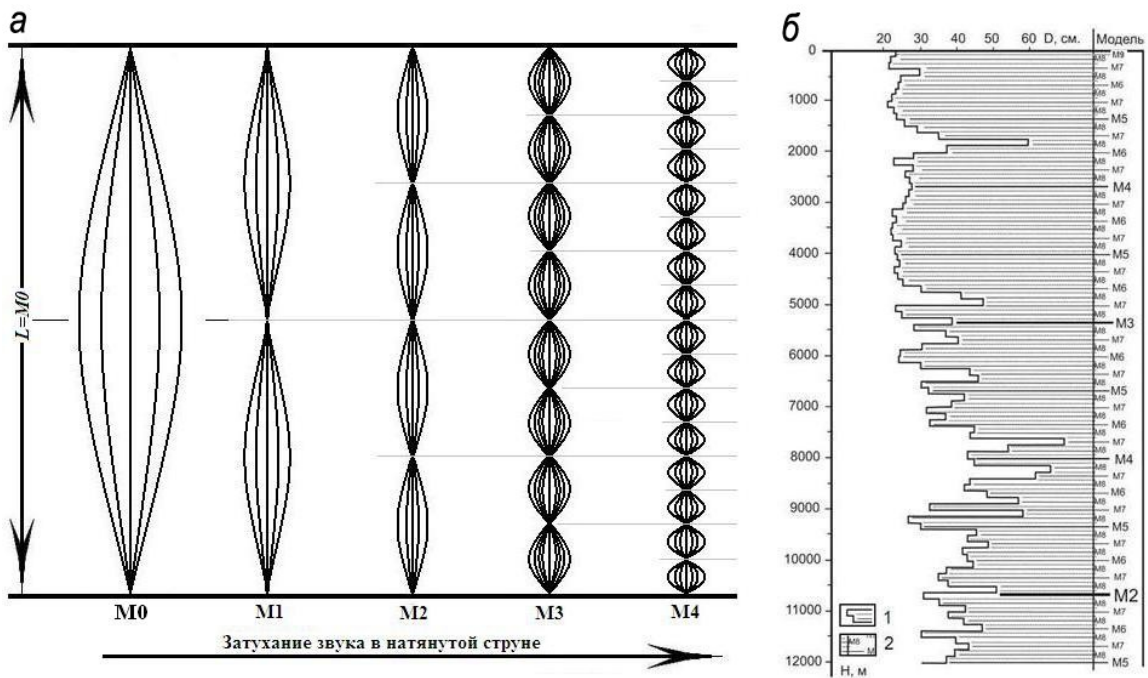


Рис. 2. Принцип построения модели тектонического расслоения ЗКПБ:
 а — затухание стоячей волны в натянутой струне; б — модель (1 — диаметр Кольской сверхглубокой скважины (размер породных вывалов D), 2 — модельные границы)

В расчете граничных параметров модели тектонического расслоения ЗКПБ использовано значение $M0 = 42 \pm 2$ км — глубина залегания границы M из работы [13]. В источнике [14] мощность ЗКПБ представлена интервалом 36–44 км.

Модельные границы совпадают с интервалами пород — концентраторами напряжений в разрезе СГ-3 с вполне удовлетворительной точностью ($\approx 74\%$, табл. 2), что подтверждает верность принципа расчета.

Таблица 2

Сравнение верхней части модели с динамическим разрезом Кольской сверхглубокой (СГ-3)

Номер моды	M5	M6	M7	M8	M9
Количество модельных границ	5	9	18	36	72
Количество совпадений границ с породными интервалами — концентраторами напряжений в СГ-3	5	7	14	20	44
Точность совпадений, %	100	77	77	55	61

Примечание. Среднее арифметическое значение точности совпадений — 74 %.

Квантование гравитационной энергии и механизм тектонического расслоения

Квант энергии (излучаемой, поглощаемой): $E = h\gamma$ (h — постоянная Планка, γ — частота колебаний). Орбитальный момент электрона: $mvr = nh/2\pi = \text{const}$. Гравитационное взаимодействие «растягивает» радиус электронной орбиты r , а значит, и волну де Бройля (λ), снижает скорость

электрона (ν), частоту ($\gamma = \nu/\lambda$) и энергию «кванта действия» ($E = h\gamma$). Снижение энергии (по ν , γ , E) исключает орбитальные «квантовые скачки» электрона (и проявление «гравитационного фотоэффекта»).

Процесс (механизм) тектонического расслоения земной оболочки на основе затухания стоячей волны, когда номер моды стоячей волны $n \rightarrow \infty$, $M_n \rightarrow 0$, очень напоминает квантование энергии частицы в «потенциальной яме» с бесконечно высокими стенками, где энергия частицы может принимать лишь определенные дискретные значения, т. е. квантуется. При этом квантованные значения энергии E_n называют уровнями энергии, а число n , определяющее уровни энергии частицы, — главным квантовым числом. С ростом n расстояние между уровнями уменьшается и при $n \rightarrow \infty$, $E_n \rightarrow 0$ (E_n практически непрерывны) и вся дискретность сглаживается, т. е. выполняется принцип соответствия Бора: при больших значениях квантовых чисел законы квантовой механики переходят в законы классической физики.

Сейсмологические границы

Для оболочки Земли типичным является дискретное (блочно-глыбовое и расслоенное) строение; элементы тектонического расслоения разделены сейсмическими границами, которые расположены на самой разной глубине. Все сейсмические границы (кроме «Мохо» и отделяющей верхний рыхлый слой от фундамента) имеют *прерывистый* характер распространения [15]; до недавнего времени этот факт, как и само явление тектонического расслоения, не имел приемлемого объяснения.

Считается, что гравитационное воздействие лунной массы проникает во внешнюю оболочку Земли на глубину около 300 км, что способствует развитию «зон дезинтеграции» на глубинах от 8 до 20–40 км [16]. Но это мнение не объясняет природу множества прочих сейсмических границ, которые делят на глобальные (100, 410, 520, 670, 2900 км) и промежуточные (60, 80, 220, 330, 710, 900, 1050, 2640 км) границы. По мере изучения Земли сейсмологи продолжают находить все новые границы (800, 1200–1300, 1700, 1900–2000 и др.) [17].

Учитывая, что любая научная теория базируется на системе постулатов и представляется не более чем субъективной моделью объективной действительности [4], предлагаемые в данной работе методы ничем не хуже уже имеющихся. Альтернативное мнение (*постулат*): волны твердого прилива возникают в оболочках планет в итоге их взаимодействия по принципу эквивалентности гравитирующих масс (ЭГМ) (просьба не путать с тождеством инертной и гравитационной масс в механиках Ньютона — Эйнштейна): *гравитационное взаимодействие планет создает в каждой планете область возмущений (приливную волну), масса которой эквивалентна массе источника возмущений; тогда размер (объем, радиус) приливной области зависит исключительно от средней плотности вещества в ее составе*. По принципу ЭГМ, гравитационное влияние Луны проникает в земную оболочку на куда более значительную глубину (об этом — ниже).

Принцип ЭГМ

По закону всемирного тяготения, на материальные точки с массой m_1 и m_2 действует сила взаимного притяжения, которая пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния (R^2) между их центрами: $F_{12} = (F_{21} = (\gamma m_1 m_2 / R^2) \mathbf{R}_{12})$

(γ — гравитационная постоянная, F_{12} — сила, действующая на точку m_1 , R_{12} — радиус-вектор из точки m_1 в точку m_2 , $R = R_{12}$). Твердое ядро Земли отделено от твердой мантии «жидким» слоем внешнего ядра, не имеет жесткой связи с мантией и, как груз в падающем лифте, должно испытывать состояние невесомости, что не влияет на момент инерции Земли (и эквивалентность масс Ньютона — Эйнштейна). Агрегатная неоднородность геосфер исключает Землю из списка «точечных масс», делая законы И. Ньютона непригодными к расчету приливного взаимодействия масс в системе Земля — Луна. Волну твердого прилива в твердой оболочке Земли вызывает лунная «точечная масса», которая и должна быть сопоставима (*простым* соотношением) с массой вещества области приливного возмущения (в составе пары приливных волн — антиподов).

Простейшее решение вытекает из принципа ЭГМ, откуда следует, что вес области твердого лунного прилива на Земле равен лунной массе ($M_L = 7,35 \cdot 10^{22}$ кг [18]). Масса ($m = V \rho$) зависит от объема (V) и плотности (ρ), объем планеты — шара: $V = 4\pi r^3/3$ (r — радиус).

Теперь выведем формулу для радиуса приливной волны во внешней оболочке Земли: $R_{ЛПВ} = (3M_L/4\pi\rho_{ЗКМО})^{1/3}$, где M_L — масса Луны, $\pi = 3,14$, $\rho_{ЗКМО} \approx 4,5$ г/см³ — средняя плотность корово-мантийной оболочки Земли; т. е. $R_{ЛПВ} \approx 1,58 \cdot 10^3 \approx 1600$ км.

Поскольку вещество земной оболочки отличается заметными пространственными вариациями плотности, глубина воздействия приливных волн-антиподов в разных точках Земли также варьирует. Длительное воздействие лунных приливов на земную оболочку с превращением ее в колебательную систему и тектоническим расслоением обособляет слой с соответственными свойствами (ритмичное расслоение фрактального типа и невыдержанная латеральная мощность) — главную колебательную систему — слой ГКС ($M_{ГКС} \approx 1600$ км). Другой (без принципиальных отличий) вывод принципа ЭГМ был сделан ранее через анализ механизма тектонического расслоения земной оболочки, где масса Луны принята за эталон и константу [19, 20 и др.], в этих же работах — примеры практического применения механизма тектонического расслоения «в нелинейных обстоятельствах».

Свойство упругости в «квантовом» масштабе

Идейная основа построения модели тектонического расслоения земной коры Печенгского блока как колебательной системы [21 и др.] — это соотношение Луи де Бройля, которое в свое время использовал Э. Шрёдингер для вывода волнового уравнения, которое сохраняет важность и в современной квантовой механике [12]. Если гравитационное взаимодействие тел порождается их массами, которые зависят от количества элементарных частиц (также обладающих массой) в составе тел, «основу» приливного возмущения следует искать в возмущающих взаимодействиях этих самых элементарных частиц.

Волны де Бройля и корпускулярно-волновой дуализм: любая частица с импульсом p создает волну, длина которой вычисляется по формуле де Бройля: $\lambda_{де\ Бр} = h/p = h/mv$ (m — масса, v — скорость, h — постоянная Планка). Длина волн де Бройля связана с радиусом электронной орбиты: $2\pi r = n\lambda_{де\ Бр}$ (n — количество электронов) [22]. Волны де Бройля иногда называют электронными волнами, хотя они и не являются электромагнитными.

Электронная орбита — это, по сути, замкнутая (кольцевая) **стоячая волна**, сформированная взаимодействием осцилляторов — электронов, которые размещены в ее узловых точках (расстояние между электронами равно длине волны де Бройля: $\lambda = 2\pi r/n$, (n — количество электронов).

Отрицательно заряженные электроны взаимно отталкиваются и в то же время притягиваются к ядру атома (положительный заряд). Возможно, что именно упругая энергия орбитальной стоячей волны не дает электронам «упасть» на ядро (рис. 3), т. е. волна де Бройля работает в атоме как *упругая связь* — итог электромагнитного взаимодействия отрицательных электронов с положительным ядром.

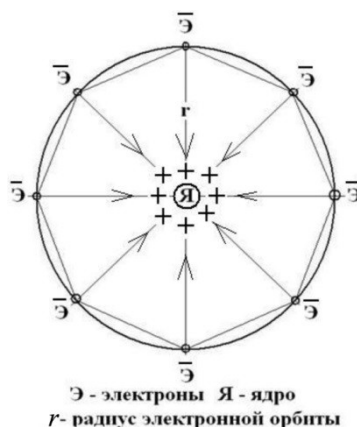


Рис. 3. Стоячая волна обеспечивает упругость электронной оболочки и «прочность» самого атома

Теперь, принимая гравитационное влияние лунной массы за единицу «энергии воздействия» — аналог «кванта действия» (h — постоянная Планка в квантовой механике) и полагая постулат о принципе ЭГМ (и все его следствия) справедливым, продолжим это рассуждение.

Средняя мощность слоя ГКС — $M_{\text{ГКС}} = H \approx 1600$ км, а наблюдаемое превышение земной поверхности на пике волны твердого прилива — $h \approx 0,5$ м [1 и др.]; результат гравитационного возмущения — упругое «растяжение струны» (радиус приливной волны), чья длина в «невозмущенном» состоянии также равна $M_{\text{ГКС}} = H$. Деформация растяжения этой «струны»: $\Delta h = h/H = 0,5 \text{ м} / 1\,600\,000 \text{ м} = 3,125 \cdot 10^{-7}$, т. е. каждый метр этой «струны» удлиняется приливом на $3,125 \cdot 10^{-7}$ м — почти в 6000 раз больше радиуса 1-й боровской орбиты атома водорода (невозмущенное состояние): $a_0 \approx 5,292 \cdot 10^{-11}$ м [22]. Считается, что «средний» радиус атома $r_a \approx 1 \text{ \AA}$ (ангстрем) равен 10^{-10} м; так как в планетном веществе атомы связаны между собой, их большинство (кроме инертных газов) пребывает в ионной форме, что «сокращает» радиусы атомов приблизительно в 2–3 раза [23]. Теперь, если 1 м равен 10^{10} Å, его можно условно представить как «цепочку» из приблизительно 10^{10} ионов и, соотнеся с «приливным удлинением струны», оценить порядок «средней упругой деформации растяжения каждого иона» в составе этой «цепочки»: $\Delta h_a = 10^{-17}$ м.

Верность расчета подтверждает информация в журнале «Природа»: «Четырнадцатого сентября 2015 г. в 09:50:45 по всемирному времени (UTC), т. е. в 12:50:45 — по московскому, 40-килограммовые зеркала двух гигантских, с длиной плеча 4 км, лазерных интерферометров Advanced LIGO, расположенных на расстоянии 3000 км друг от друга в штатах Вашингтон и Луизиана в США, почти одновременно (задержка ≈ 7 мс) исполнили довольно затейливый танец, форма которого задолго до этого была предсказана и детально просчитана астрофизиками.

Амплитуда этого танца, с «обычной» точки зрения, была ничтожно мала — порядка 10^{-18} м. Тем не менее, она в несколько раз превысила амплитуду случайных дрожаний зеркал, вызванных сейсмикой и тепловыми шумами, что позволило участникам этого проекта с высокой степенью уверенности заявить о регистрации гравитационно-волнового сигнала от произошедшего примерно 1,3 млрд лет назад слияния двух черных дыр. Это событие завершило тянувшийся почти полвека эмбриональный период развития гравитационно-волновой астрономии, за все время которого гравитационных волн обнаружено не было» [24].

Заключение

Полученная величина «приливной упругой деформации» ничтожно мала и может лишь подтверждать правомерность отнесения гравитации к числу «слабых взаимодействий» с большим дальностью действия (и «времедействием»). Макроскопичность явления твердого прилива (выпуклость земной поверхности) обусловлена «упругой деформацией» электронных оболочек множества атомов в составе приливно-волновой области с гравитационным «растяжением» на ничтожную величину каждой круговой электронной орбиты (системы стоячих волн). Этот эффект «растяжения» выглядит как аналог (со знаком «минус») эффекта ССВ [4].

Видимо, приведенной информации достаточно, чтобы рассматривать макроскопическое явление — волну твердого прилива — как совокупный «квантовый эффект» и, таким образом, для дальнейшего изучения роли приливных волн в геодинамических процессах и природы гравитации целесообразнее было бы использовать подходы и методы, применяемые в квантовой механике.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авсюк Ю. Н.* Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 188 с.
2. *Долгинов А. З.* Строение материи: от атомов до Вселенной. М.: Изд-во МЦНМО, 2012. 160 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 122: [приложение к журналу «Квант»]. 2011. № 4).
3. *Владимиров Ю. С.* Классическая теория гравитации. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 264 с.
4. *Иванов Ю. Н.* Ритмодинамика. М.: Энергия, 2007. 215 с.
5. *Филиппов А. Т.* Многоликий солитон. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 224 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 48).
6. *Евзикова Н. З.* Концепция дипольного строения геологических тел // Рос. геофиз. журн. 1994. № 3–4. С. 89–95.
7. *Каганов М. И.* Электроны, фононы, магноны. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. 192 с.
8. *Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г.* Пластичность горных пород. М.: Недра, 1979. 301 с.
9. СОЛИТОН. URL: <http://ir.on.ufanet.ru/soliton/gallery.htm>.
10. *Поликарпов В. К.* Энергетическая характеристика гравитационного поля // Рос. геофиз. журн. 2007. № 45–46. С. 101–104.
11. *Кабисов Т. С., Камалов Т. Ф., Лурье В. А.* Колебания и волновые процессы: Теория. Задачи с решениями. М.: КомКнига, 2005. 360 с.
12. *Пономарёв Л. И.* Под знаком кванта. 2-е изд., испр. и доп. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 368 с.
13. *Трипольский А. А., Шаров Н. В.* Литосфера докембрийских щитов Северного полушария Земли по сейсмическим данным. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 159 с.
14. *Березовский Н. С., Галдин Н. Е., Кузнецов Ю. И.* Геофизическое исследование сверхглубоких скважин (Кольской и Новоелховской) как основа интерпретации геологического строения кристаллического фундамента. Тверь: Изд-во АИС, 2006. 395 с.
15. *Шаров Н. В.* Литосфера Балтийского щита по сейсмическим данным: автореферат дис. ... д. г.-м. н. Киев, 1991. 32 с.
16. *Адушкин В. В., Спивак А. А.* Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 2014. 360 с.
17. *Пуцаровский Д. Ю., Пуцаровский Ю. М.* Состав и строение мантии Земли // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 11. С. 111–119.
18. *Ранцини Ж.* Космос. Сверхновый атлас Вселенной: пер. с англ. М.: Эксмо, 2004. 216 с.
19. *Ильченко В.* Приливные волны и динамическая эволюция Земли. Саарбрюккен: LAMBERT Academic Publishing, 2013. 292 с.
20. *Ильченко В. Л.* Космические факторы (влияние Луны и Солнца) в геодинамике и возможность их применения в нефтегазовой отрасли (для некоторых видов прогноза) // Новые идеи в геологии нефти и газа — 2015: сб. науч. тр. (по материалам междунар. науч.-практ. конф.) / отв. ред. А. В. Ступакова. М.: Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 2015. С. 33–36.
21. *Ильченко В. Л.* Тектоностратиграфическая модель блока земной коры как колебательной системы (на примере Печенгского блока, Кольский полуостров) // Вестник

Кольского научного центра РАН. 2012. № 1. С. 173–178. **22.** Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М.: 1974. 944 с. **23.** Лебедев В. И. Ионно-атомные радиусы и их значение для геохимии и химии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1969. 156 с. **24.** Халили Ф. Я. Лазерная интерферометрия: за занавесом триумфа // Природа. 2016. № 6. С. 54–61.

Сведения об авторе

Ильченко Вадим Леонидович — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН
E-mail: vadim@geoksc.apatity.ru

AuthorAffiliation

Vadim L. Il'chenko — PhD (Geology and Mineralogy), Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS
E-mail: vadim@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

Ильченко В. Л. Квантование лунной гравитации (энергии приливной волны) в земной оболочке и «квантовая» основа силы упругости // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 1 (9). — С. 34–42.

Reference

Il'chenko Vadim L. Quantization of Lunar Gravity (Tidal Waves Energy) in the Earth Shell and "Quantum" Basis of Elastic Force. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1 (9), pp. 34–42 (In Russ.).

УДК 553.493.5

**РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ ПЕГМАТИТЫ КОЛМОЗЕРСКОГО ЛИТИЕВОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА БАЛТИЙСКОГО ЩИТА:
НОВЫЕ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ**

**Л. Н. Морозова, Т. Б. Баянова, А. В. Базай, Л. М. Лялина,
П. А. Серов, Е. С. Борисенко, Е. Л. Кунаккузин**
ФБГУН Геологический институт КНЦ РАН

Аннотация

Редкометалльные пегматиты Колмозерского месторождения лития с попутным танталом, ниобием и бериллием локализованы в неархейских метагаббро-анортозитах Патчемварекского массива в зоне сочленения двух крупных региональных структур архейского возраста — Мурманского террейна и зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья. Установлено, что U-Pb-изотопный возраст кристаллизации колумбита-(Mn) и связанного с ним оруденения составляет 2315 ± 10 млн лет (СКВО = 0,34).

Ключевые слова

редкометалльные пегматиты, колумбит, циркон, геохронология, Кольский регион, Балтийский щит.

**RARE METAL PEGMATITES OF THE KOLMOZERO LITHIUM DEPOSIT OF THE ARCTIC REGION
OF THE BALTIC SHIELD: NEW GEOCHRONOLOGICAL DATA**

**Lyudmila N. Morozova, Tamara B. Bayanova, Aya V. Bazay, Lyudmila M. Lalina,
Paul A. Serov, Elena S. Borisenko, Eugene L. Kunakkuzin**
Geological Institute of the KSC of the RAS

Abstract

The Kolmzero rare metal (spodumene) deposit is situated in the area of the junction of two major regional structures of Archaean age — Murmansk Terrain and greenstone belt of Kolmzero Raven. The pegmatites of the Kolmzero deposit are located in Neoproterozoic metagabbro-anorthosite of the Patchemvarek Massif. The pegmatites belong to the albite-spodumene type and are characterized by similar modal mineralogy and similar weakly differentiated internal structures. Pegmatites of albite-spodumene type consist of 30–35 % quartz, 30–35 % albite, 10–25 % potassium feldspar, 18–20 % spodumene and 5–7 % muscovite. Albite-spodumenepegmatites have high concentrations of Li, Be, Nb, Ta, Cs, Rb, Cu, Ni, Cr, Ga, Ge, Mo, Zn and low concentrations of TiO, MgO, CaO, Sr, Ba, Zr, Th, Y, Σ REE. U-Pb radiometric ages obtained for columbite-(Mn) is 2315 ± 10 Ma (MSWD = 0,34).

Keywords:

rare metal pegmatites, columbite, zircon, geochronology, the Kola region, the Baltic Shield.

Введение

Месторождения редкометалльных пегматитов характеризуются комплексным составом редкометалльного сырья и являются источниками лития, тантала, ниобия, бериллия, олова и цезия. На территории России запасы оксида лития подсчитаны по 15 месторождениям, из которых 9 относятся к месторождениям редкометалльных пегматитов. При этом в Колмозерском месторождении сосредоточено около 26 % запасов лития России [1].

Приоритетным направлением исследований этих месторождений является изучение закономерностей временного и пространственного расположения редкометалльных пегматитов в различных геодинамических обстановках и их взаимосвязи с особенностями строения земной коры. Проблемы изучения редкометалльных пегматитов палеопротерозойского возраста на сегодняшний день заключаются в выявлении природы редкометалльного магматизма, трудностей датирования пегматитов вследствие изменения циркона в процессе пегматитообразования, а также в установлении связи редкометалльного магматизма с другими магматическими проявлениями близкого возраста.

Цели данного исследования — определение современными методами возраста формирования альбит-сподуменовых пегматитов Колмозерского месторождения и изучение химического состава и внутреннего строения циркона и колумбита.

Геологическое положение и строение месторождения

В арктической зоне северо-востока Балтийского щита располагается ряд крупных месторождений редкометалльных пегматитов с литиевой, цезиевой, танталовой и бериллиевой минерализацией — Охмыльк, Васин-Мыльк, Олений хребет, Полмостундровское и Колмозерское, образующих крупный пегматитовый пояс (рис. 1). Жилы редкометалльных пегматитов содержат сподумен, поллуцит, колумбит, танталит и берилл. Колмозерское месторождение лития с попутными бериллием, танталом и ниобием находится в юго-восточной части пегматитового пояса и локализовано в неoarхейских метагббро-анортозитах Патчемварекского массива в зоне сочленения двух региональных структур архейского возраста — Мурманского террейна и зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья.

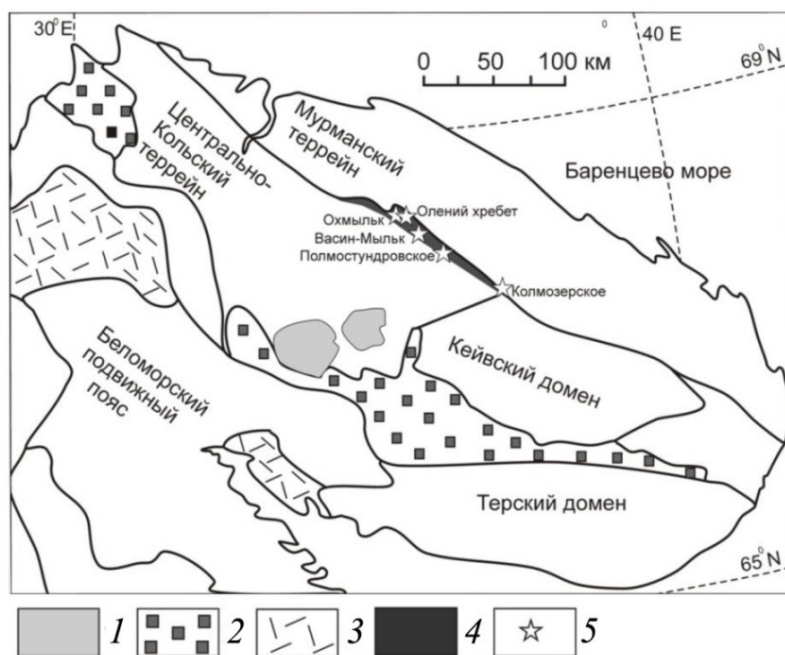


Рис. 1. Положение Колмозерского месторождения лития с попутными бериллием, танталом и ниобием на тектонической схеме Балтийского щита:

- 1 — палеозойские интрузии нефелиновых сиенитов; 2 — Печенгская и Имандро-Варзугская зона карелид;
- 3 — Лапландский гранулитовый пояс; 4 — архейский зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья;
- 5 — местоположение месторождений редкометалльных пегматитов

Патчемварекский массив метагаббро-анортозитов представляет собой крутопадающую на северо-восток тектоническую пластину, которая простирается с ЮВ на СЗ (300–310°) приблизительно на 7 км. Массив сложен крупно- и среднезернистыми амфиболизированными и эпидотизированными мезо-, лейкократовыми метагаббро и метаанортозитами. Возраст кристаллизации габбро-анортозитов Патчемварекского массива составляет $2661,8 \pm 7,1$ млн лет (SIMS, U-Pb циркон) [2]. Цирконы из метагаббро-анортозитов с возрастом 2,93 млрд лет [3], согласно новым данным [2], рассматриваются как ксеногенные, захваченные из вмещающих тоналит-трондьемитовых гнейсов Мурманского террейна.

Колмозерское месторождение представлено 12 крупными и несколькими мелкими жилами альбит-сподуменовых пегматитов, секущими метагаббро-анортозиты Патчемварекского массива (рис. 2). Жилы пегматитов секутся дайками габбро-долеритов, предположительно, палеозойского возраста. Структура Колмозерского месторождения осложнена сбросом северо-западного простирания. Жилы пегматитов с апофизами, раздувами и пережимами имеют протяженность до 1 400 м и мощность от 5 до 65 м и, по данным бурения, прослеживаются на глубину более 500 м. Альбит-сподуменные пегматиты катаклазированы и разбиты трещинами, по которым наблюдается смещение отдельных блоков. Редкометалльные пегматиты содержат ксенолиты метаморфизованных и рассланцованных вмещающих пород, что свидетельствует о внедрении пегматитового расплава в измененные в процессе метаморфизма и деформации габбро-анортозиты. Контакты пегматитов с метагабброидами интрузивные, иногда тектонизированные. В зоне эндоконтакта отмечается развитие тонкоигольчатого холмквистита и биотита.

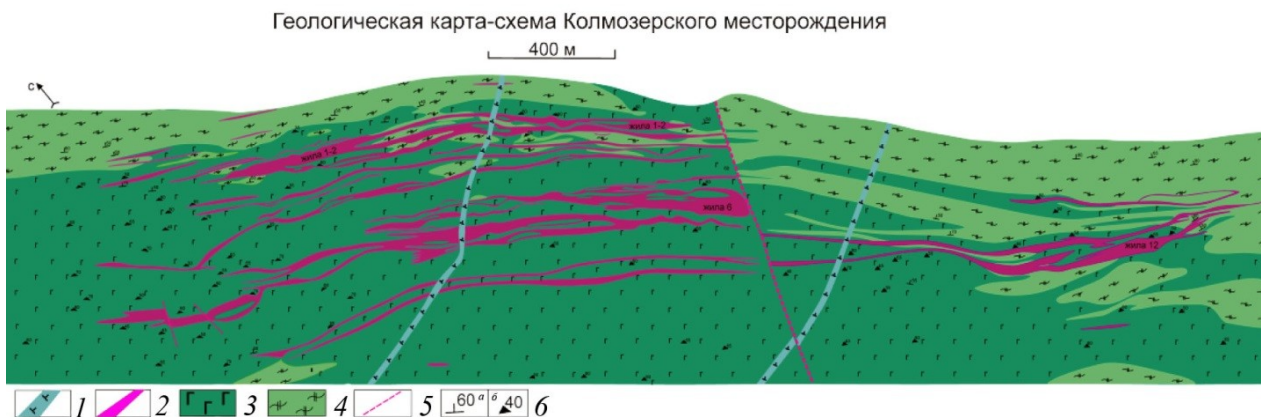


Рис. 2. Геологическая карта-схема Колмозерского месторождения редкометалльных пегматитов (составлена Л. Н. Морозовой по материалам СХГУ с упрощениями):

- 1 — дайки габбро-долеритов; 2 — жилы альбит-сподуменовых пегматитов; 3 — метагаббро-анортозиты; 4 — амфиболиты; 5 — тектонические нарушения; 6 — полосчатость (а), трахитоидность (б)

Крутопадающие на юго-запад плитообразные тела редкометалльных пегматитов Колмозерского месторождения характеризуются выдержанным внутренним строением по падению и простиранию и отличаются по интенсивности развития вторичных аплитов. Жилы пегматитов имеют слабо выраженное зональное строение, устанавливаемое по доминирующей минеральной ассоциации и структурным особенностям. Внутренняя зона пегматитов, занимающая до 80 % объема жил, сложена кварц-сподумен-полевошпатовым агрегатом. В этой зоне дощевидные кристаллы сподумена достигают 1,5 м в длину (рис. 3).

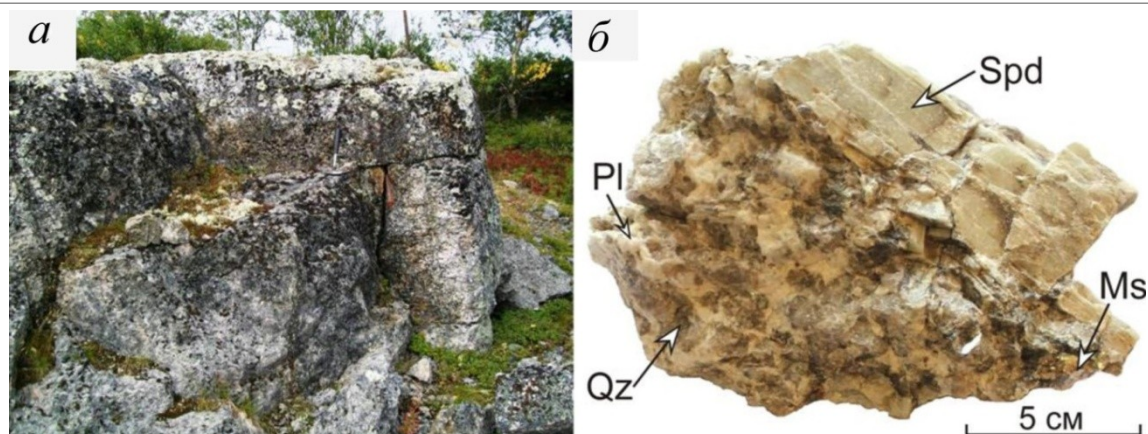


Рис. 3. Жила альбит-сподуменовых пегматитов Колмозерского месторождения:
a — зона кварц-сподумен-полевошпатового пегматита; *б* — кристалл сподумена

Редкометалльные пегматиты представляют собой лейкократовые породы с неоднородной структурой, закономерно меняющейся от мелкозернистой в краевой зоне до пегматоидной и блоковой в центральной.

Породообразующие минералы пород: кварц (30–35 %), плагиоклаз (30–35 %), микроклин (10–25 %), сподумен (18–20 %) и мусковит (5–7 %) [4].

Наиболее распространенные акцессорные минералы: сине-зеленый апатит, литиофилит, спессартин, колумбит, танталит, ильменит, магнетит, циркон.

Вторичные минералы представлены фосфатами и цеолитами.

Рудные минералы: сподумен, танталит, колумбит и берилл.

Всего в альбит-сподуменовых пегматитах, по данным В. В. Гордиенко [4], установлено 64 минеральных вида.

Альбит-сподуменные пегматиты резко обогащены Li, Be, Nb, Ta, Cs, Rb, Cu, Ni, Cr, Ga, Ge, Mo, Zn и обеднены TiO, MgO, CaO, Sr, Ba, Zr, Th, Y, Σ REE, что является типичным для пегматитов редкометалльного типа [5–8]. Пегматиты характеризуются высокими величинами индекса редкометалльности ($I_p = F^*(Li + Rb + Cs + Be + Nb + Ta)/(Sr + Ba)$), достигающего в среднем значения 167347, и низкими величинами индикаторных отношений — Zr/Hf (6,2), Mg/Li(0,62) и Ba/Sr (0,93).

В классификациях, предложенных разными исследователями, изученные породы относятся к альбит-сподуменовому типу [9, 10], альбит-сподуменовому подтипу семейства LCT (литий-цезий-тантал) редкометалльных пегматитов [11–13] либо к литиевому типу подформации сподуменовых пегматитов [14].

Методы исследования

Химические составы циркона и колумбита были определены методом локального рентгеноспектрального электронно-зондового анализа на микроанализаторе MS-46 Cameca.

Условия анализов: ускоряющее напряжение — 22 кВ, ток электронного зонда — 30 нА.

Аналитические линии и эталоны для циркона: синтетический циркон (ZrLa1), диопсид (Ca, SiKa1), магнетит (FeKa1), MnCO₃ (MnKa1), U-металл (UMa1), Hf-металл (HfLb1).

Аналитические линии и эталоны для колумбита: магнетит (FeKa1), MnCO₃ (MnKa1), анатаз (TiKa1), Ta-металл (TaLa1), Nb-металл (NbLa1).

Изучение внутреннего строения циркона и колумбита и качественная диагностика включений в минералах проводились с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO-1450 с энергодисперсионной рентгеновской системой QUANTAX 200.

Изотопные U-Pb-исследования колумбита-(Mn) были проведены по методике, отработанной для циркона. Химические процедуры разложения колумбита-(Mn) выполнены по методике [15]. Были использованы общепринятые константы распада [16], коррекция на примесь обыкновенного свинца проведена по модели [17], координаты U-Pb-точек и параметры изохроны рассчитаны по программам [18, 19], все ошибки даны на уровне 2σ . Изотопные U-Pb-исследования проведены на 7-канальном немецком масс-спектрометре Finnigan-MAT-262, оснащенный квадрупольной установкой (RPG) в статическом режиме. Полное описание всех процедур исследований приведено в работе [20].

Изотопно-геохимические исследования

Датирование альбит-сподуменовых пегматитов Колмозерского литиевого месторождения U-Pb изотопным методом по циркону оказалось затруднительным в силу высокой неоднородности внутреннего строения этого минерала. Как показали проведенные исследования, циркон из редкометалльных пегматитов Колмозерского месторождения представлен двумя гранулометрическими классами: крупным — до 0,4–0,45 мм (по ребру) и мелким — до 0,2 мм.

Циркон крупного гранулометрического класса дипирамидальной формы, непрозрачный, серо-коричневого цвета, с тусклым (до жирного) блеском на гранях кристаллов. Грани кристаллов неровные, шероховатые.

Мелкий циркон представлен кристаллами дипирамидальной и призматической формы и по остальным характеристикам (цвет, прозрачность, блеск, характер граней) однотипен с крупным цирконом.

Внутреннее строение крупного и мелкого цирконов характеризуется внутрифазовой (мозаично-пятнистая структура) и фазовой (включения) неоднородностью (рис. 4). Твердофазные (минеральные) включения представлены кварцем, альбитом, микроклином и оксидами урана. Мозаично-пятнистая структура четко просматривается на BSE (отраженные электроны) изображениях циркона и, вероятнее всего, обусловлена процессами посткристаллизационного изменения минерала.

По концентрациям ZrO_2 (50,42–62,24 мас. %) и SiO_2 (30,78–35,32 мас. %) изученные цирконы близки между собой и характеризуются низкими отношениями ZrO_2/HfO_2 (4,0–8,05) и высокими концентрациями гафния ($HfO_2 = 7,03–13,76$ мас. %), что указывает на высокое содержание этого компонента в среде кристаллизации. Из элементов-примесей в рассматриваемых цирконах также присутствуют Fe, Mn, Ca, и U. Повышенные концентрации U (до 0,75 мас. %) в изученных цирконах, вероятнее всего, обусловлены включениями минералов урана, которые могли быть захвачены в процессе роста циркона или образованы при вторичных изменениях. В цирконовой матрице разные по интенсивности окраски зоны, формирующие мозаично-пятнистую структуру, различаются по химическому составу. Более темные зоны, по сравнению со светлыми, обогащены Fe, Mn и Ca.

Определение возраста формирования редкометалльных пегматитов Колмозерского месторождения U-Pb изотопным методом было проведено по одному из главных рудных минералов — колумбиту-(Mn). Как показал анализ литературных данных [21, 22], танталит и колумбит широко используются для U-Pb геохронологических исследований редкометалльных пегматитов.

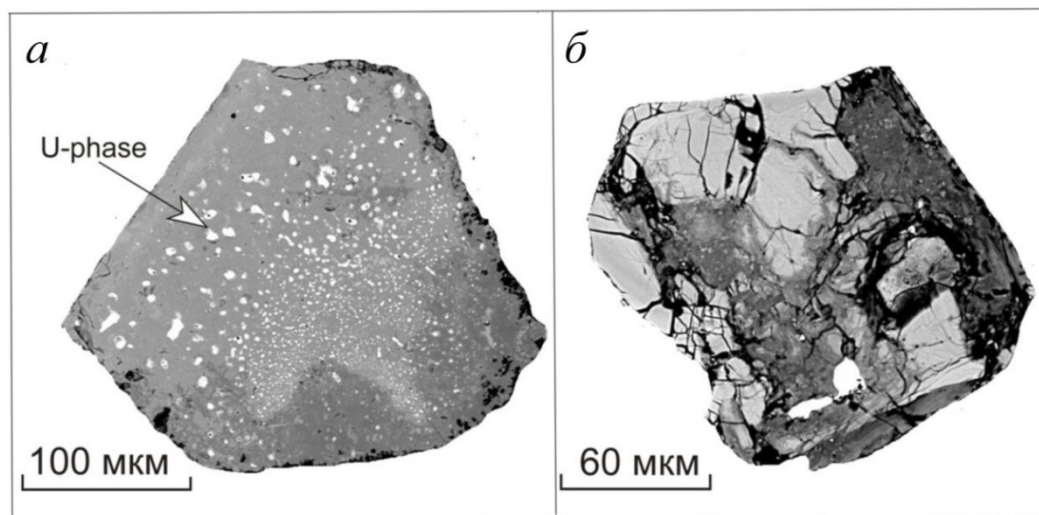


Рис. 4. Фазовая (а) и внутрифазовая (б) и неоднородность циркона. BSE (отраженные электроны) изображения циркона

Для изотопных U-Pb-исследований были отобраны обломки непрозрачных кристаллов колумбита-(Mn) таблитчатой, изометричной и неправильной формы черного цвета со смолистым блеском (проба К1-ГХ-11). Для большинства зерен колумбита-(Mn) характерна магматическая зональность (рис. 5). В единичных зернах отмечается пятнистая зональность, вероятнее всего обусловленная изменением минерала на постмагматической стадии. Минеральные включения в колумбите-(Mn) представлены оксидами урана, микроклином, кварцем, альбитом и кальцитом. По химическому составу колумбит соответствует манганоколумбиту и содержит: Nb_2O_5 — от 50,43 до 59,88 мас. %; Ta_2O_5 — от 19,54 до 28,90 мас. %; MnO — от 9,98 до 12,78 мас. %; FeO — от 7,62 до 10,10 мас. %. Отношения $Ta/(Ta+Nb)$ варьируют от 0,16 до 0,35, а $Mn/(Mn+Fe)$ — от 0,50 до 0,63.

Изотопный U-Pb-возраст колумбита-(Mn) по верхнему пересечению дискордии с конкордией определен в 2315 ± 10 млн лет (СКВО = 0,34) (рис. 6) [23]. Нижнее пересечение дискордии с конкордией определено в 932 ± 252 млн лет и соответствует времени неопротерозойского магматизма, проявленного в пределах Балтийского щита [24].

Геодинамика палеопротерозойского этапа (2,55–2,00 млрд лет) развития восточной части Балтийского щита в сформированном в конце архея северном суперконтиненте (Балтика + Гренландия + Лаврентия) была связана с проявлением плюм-рифтогенных процессов. Плюмовый магматизм рифтовых зон сопровождался формированием крупных месторождений Cr, Ni, Cu, Ti, V, Pd, Pt и Rh (+Au) [25]. Полученные новые геохронологические данные свидетельствуют о том, что одно из крупнейших в России Колмозерское литиевое месторождение (2,32 млрд лет) было сформировано на фоне регионального рифтогенеза,

связываемого с мантийным суперплюмом. Горячие мантийные плюмы, или горячие мантийные струи, оказывают значительное влияние на развитие крупных геологических структур и магматизм редкометалльных металлогенических провинций. В пределах таких провинций сосредоточены крупные промышленные месторождения полезных ископаемых с различными типами материнских рудообразующих магм [26 и др.].

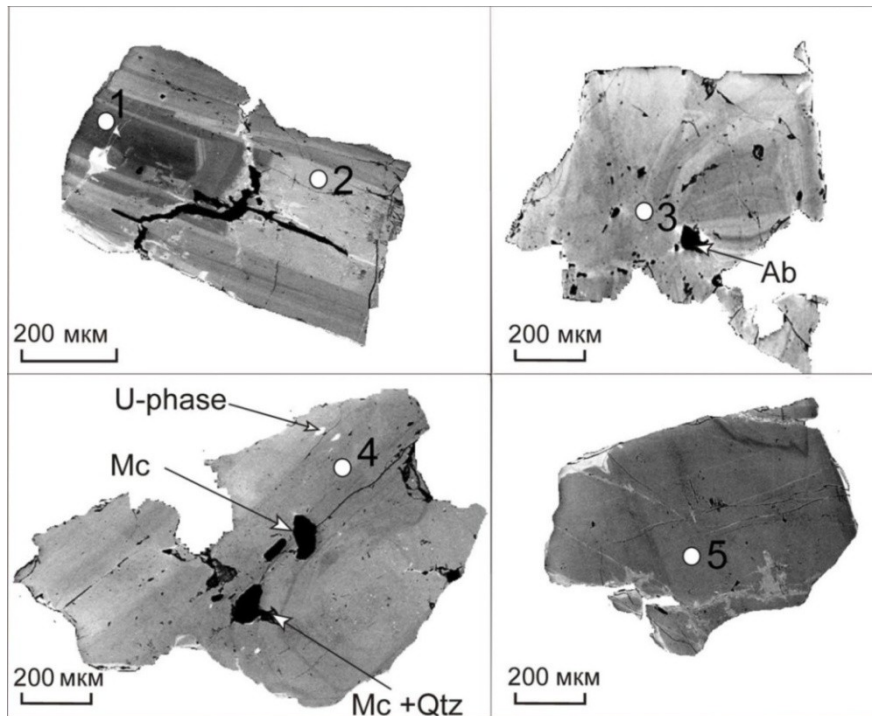


Рис. 5. BSE (отраженные электроны) изображения колумбита-(Mn)

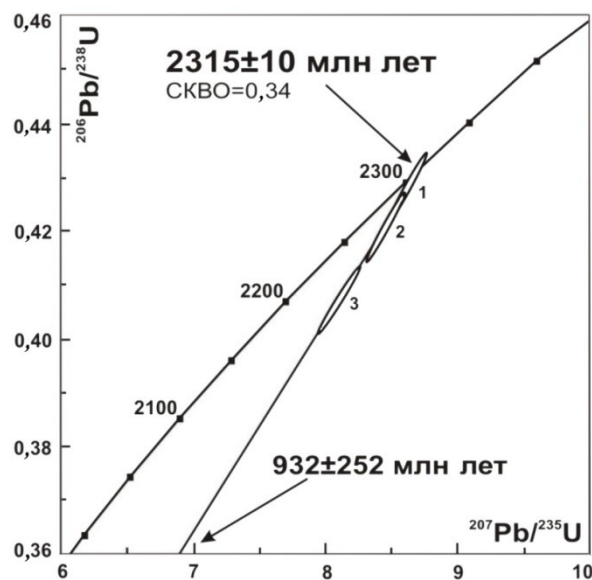


Рис. 6. Диаграмма с конкордией для колумбита-(Mn) из редкометалльных пегматитов Колмозерского литиевого месторождения

Выводы

Таким образом, возраст кристаллизации колумбита-(Mn) и связанного с ним оруденения составил 2315 ± 10 млн лет и свидетельствует о формировании редкометалльных пегматитов Колмозерского литиевого месторождения на палеопротерозойском этапе развития региона на фоне регионального рифтогенеза, связываемого с мантийным суперплюмом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быховский Л. З., Архипова Н. А. Редкометалльное сырье России: перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы // Разведка и охрана недр. 2016. № 11. С. 26–30.
2. Вревский А. Б., Львов П. А. Изотопно-геохимические особенности и возраст анорогенных дифференцированных базитовых интрузий неогархейской инфраструктурной зоны Колмозеро-Воронья-Кейвы (Кольский полуостров) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. № 12. С. 29–35.
3. Кудряшов Н. М., Мокрушин А. В. Мезоархейский габбро-анортозитовый магматизм Кольского региона: петрохимические, геохронологические и изотопно-геохимические данные // Петрология. 2011. Т. 19, № 2. С. 137–189.
4. Гордиенко В. В. Минералогия, геохимия и генезис сподуменовых пегматитов. Л.: Недра, 1970. 239 с.
5. Морозова Л. Н., Серов П. А., Баянова Т. Б. Новые данные по альбит-сподуменовым и полевошпатовым пегматитам Колмозерского месторождения (Балтийский щит) // Благородные, редкие и радиоактивные элементы в рудообразующих системах. Новосибирск: Изд-во ИГМ СО РАН, 2014. С. 466–476.
6. Геологические строение и геохимические особенности состава редкометалльных пегматитов Колмозерского месторождения (Балтийский щит, Россия) / Л. Н. Морозова [и др.] // Крупные изверженные провинции, мантийные плюмы и металлогения в истории Земли: Новосибирск: Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2015. С. 69–70.
7. Особенности строения и редкоэлементного состава редкометалльных пегматитов Колмозерского месторождения / Л. Н. Морозова [и др.] // Труды XII Всерос. (с междунар. участием) Ферсмановской сессии. Апатиты: K&M, 2015. С. 138–140.
8. Морозова Л. Н. Редкометалльные пегматиты Колмозерского пегматитового поля: строение, особенности состава // Региональная геология, минералогия и полезные ископаемые Кольского полуострова. Апатиты: K&M, 2016. С. 203–207.
9. Власов К. А. Принципы классификации гранитных пегматитов и их текстурно-парагенетические типы // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1961. № 1. С. 8–29.
10. Солодов Н. А. Внутреннее строение и геохимия редкометалльных гранитных пегматитов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 234 с.
11. Černý P. Rare-element granitic pegmatites. Part 1: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits // Geoscience Canada. 1991. Vol. 18. No. 2. P. 49–67.
12. Černý P. Geochemical and petrogenetic features of mineralization in rare-element granitic pegmatite sib the light of current research // Applied Geochemistry. 1992. Vol. 7. P. 393–416.
13. Černý P., Ercit T. S. Classification of granitic pegmatites // Canadian Mineralogist. V. 43. Rare-element granitic pegmatites. Part 1: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits // Geoscience Canada. 2005. Vol. 18, No. 2. P. 49–67.
14. Систематика гранитных пегматитов / В. Е. Загорский [и др.] // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 5. С. 422–435.
15. Krogh T. E. A low-contamination method for hydrothermal dissolution of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations // Geochim. Cosmochim. Acta. 1973. Vol. 37. P. 485–494.
16. Steiger R. H., Jäger E. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology // Earth Planet. Sci. Lett. 1977. Vol. 36, No. 3. P. 359–362.
17. Stacey J. S., Kramers J. D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // Earth Planet. Sci. Lett. 1975. Vol. 26, No. 2. P. 207–221.
18. Ludwig K. R. ISOPLOT/Ex — A geochronological toolkit for Microsoft Excel, Version 2.05 // Berkeley Geochronology Center Special Publication. 1999. No. 1a. 49 p.
19. Ludwig K. R. PBDAT — A Computer Program for Processing Pb-U-Th isotope Data. Version 1.22 // Open-file report 88–542. USGeol. Surv. 1991. 38 p.
20. Баянова Т. Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб.: Наука, 2004. 174 с.
21. О возрасте Вишняковского месторождения редкометалльных пегматитов (Восточный Саян): результаты U-Pb геохронологических исследований манганотанталита / Е. Б. Сальникова [и др.] // ДАН. 2011. Т. 441, № 1. С. 72–76.
22. Analytical fingerprint of columbite-tantalite(coltan) mineralization in pegmatites: focus on Africa / M. Melcher [et al.] // Proc. Ninth Intern. Congress for Applied Mineralogy (ICAM) 2008 Qld / Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Brisbane, 2008. P. 615–624.
23. Зональность и возраст редкометалльного оруденения Колмозерского литиевого месторождения (Арктическая зона Балтийского щита) / Л. Н. Морозова [и др.] // Роль геохимии в развитии минерально-сырьевой базы ТПИ. Прогноз, поиски, оценка и инновационные технологии освоения редкометалльных объектов. М.: ИМГРЭ, 2016. С. 109–110.
24. Каталог геохронологических

данных по северо-восточной части Балтийского щита / Т. Б. Баянова [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 53 с.
25. Митрофанов Ф. П. Раннедокембрийская геодинамика, магматизм и металлогения Кольской провинции // Вестник МГТУ. Т. 12, № 4. 2009. С. 567–570. 26. Типы магм и их источники в истории Земли. Ч. 2 / В. И. Коваленко [и др.]. М.: ИГЕМ РАН, 2006. 280 с.

Сведения об авторах

Морозова Людмила Николаевна — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: morozova@geoksc.apatity.ru

Баянова Тамара Борисовна — доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией Геологического института КНЦ РАН

E-mail: tamara@geoksc.apatity.ru

Базай Айя Валериевна — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: bazai@geoksc.apatity.ru

Лялина Людмила Михайловна — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: Lialina@geoksc.apatity.ru

Серов Павел Александрович — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: serov@geoksc.apatity.ru

Борисенко Елена Сергеевна — младший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: elena.s.borisenko@gmail.ru

Кунаккузин Евгений Леонидович — младший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: kunakkuzin@geoksc.apatity.ru

Author Affiliation

Lyudmila N. Morozova — PhD (Geology and Mineralogy), Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: morozova@geoksc.apatity.ru

Tamara B. Bayanova — Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of Laboratory of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: tamara@geoksc.apatity.ru

Aya V. Bazay — PhD (Geology and Mineralogy), Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: bazai@geoksc.apatity.ru

Lyudmila M. Lalina — PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: Lialina@geoksc.apatity.ru

Paul A. Serov — PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: serov@geoksc.apatity.ru

Elena S. Borisenko — Junior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: elena.s.borisenko@gmail.ru

Eugene L. Kunakkuzin — Junior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: kunakkuzin@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

Редкометалльные пегматиты Колмозерского литиевого месторождения арктического региона Балтийского щита: новые геохронологические данные / Л. Н. Морозова [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 1 (9). — С. 43–52.

Reference

Morozova Lyudmila N., Bayanova Tamara B., Bazay Aya V., Lalina Lyudmila M., Serov Paul A., Borisenko Elena S., Kunakkuzin Eugene L. Rare Metal Pegmatites of the Kolmozero Lithium Deposit of the Arctic Region of the Baltic Shield: New Geochronological Data. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2017, vol. 1 (9), pp. 43–52 (In Russ.).

УДК 549.3

ЗОЛОТО И СЕРЕБРО В СОСТАВЕ ПЛАТИНОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД ФЕДОРОВО-ПАНСКОГО ИНТРУЗИВНОГО РАССЛОЕННОГО КОМПЛЕКСА

В. В. Субботин, Д. А. Габов, А. У. Корчагин, Е. Э. Савченко
ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

Аннотация

Золотосеребряная минерализация в платинометалльных месторождениях и рудопоявлениях Федорово-Панского интрузивного комплекса сингенетична вкрапленным первично-магматическим Cu-Ni-Fe-сульфидам и платиноидам. Практически значимыми концентраторами и золота, и серебра являются Au-Ag-сплавы. Для серебра большое значение также имеют аргентопентландит, сложные сульфиды и теллуриды Ag и Pd, твердые растворы серебра в халькопирите. Составы Au-Ag-сплавов меняются от высокопробного золота до обогащенного золотом серебра. Среди многочисленных сложных сульфидов и теллуридов — концентраторов серебра — установлены колдвеллит (первая находка в России и вторая в мире) и луккулайсваараит (вторая находка в России и мире). В ассоциации с Ag-Pd-минералами впервые в России установлен природный германид палладия — маратонит.

Ключевые слова:

Федорово-Панский интрузивный комплекс, малосульфидное платинометалльное оруденение, минералы золота и серебра, платиноиды, сульфиды, теллуриды, колдвеллит, луккулайсваараит, маратонит.

GOLD AND SILVER IN THE COMPOSITION OF PGE ORES OF THE FEDOROV-PANA LAYERED INTRUSIVE COMPLEX

Victor V. Subbotin, Dmitriy A. Gabov, Alexey U. Korchagin, Eugene E. Savchenko
Geological Institute of the KSC of the RAS

Abstract

The gold-silver mineralization in PGE deposits and ore localities of the Fedorov-Pana intrusive complex and disseminated originally magmatic Cu-Ni-Fe-sulphides and platinoids is syngenetic. Au-Ag-alloys are practically valuable concentrators of both gold and silver. Argentopentlandite, complex sulphides and tellurides of Ag and Pd, solid solutions of silver in chalcopyrite are also important for silver. Composition of Au-Ag-alloys vary from fine gold to silver rich in gold. Among numerous silver concentrators of complex sulphides and tellurides, coldwellite (the first find in Russia and the second find in the world) and lukkulaisvaarait (the second find in Russia and in the world) have been defined. The native palladium germanite, i. e. marathonite, associated with Ag-Pd-minerals, has been first discovered in Russia.

Keywords:

Fedorov-Pana intrusive complex, low sulphide PGE mineralization, gold and silver minerals, PGM, sulphides, tellurides, coldwellite, lukkulaisvaarait, marathonite.

Введение

Золото и серебро являются закономерными и постоянными составляющими геохимической ассоциации элементов благородных металлов магматических сульфидных месторождений платинометалльных руд. В рудах крупнейших мировых месторождений этого типа концентрации золота варьируют от сотых и десятых долей до первых граммов на тонну. Сведения о содержаниях серебра чаще всего отсутствуют, так как в подавляющем большинстве случаев при оценке месторождений пробы на данный компонент не анализируются.

В рудах месторождений Федорова тундра, Киевей, Северный Каменник, Восточный Чуарвы, недавно разведанных в Федорово-Панском интрузивном комплексе на Кольском п-ове [1, 2 и др.], содержания золота, по данным технологического опробования, составляют в среднем 0,11–0,22 г/т, серебра — 0,35 г/т. В отдельных рядовых пробах концентрации золота могут достигать 1–2 г/т, серебра — 2,38 г/т. Эти значения согласуются с уровнями содержаний золота и серебра в рудах большинства малосульфидных платинометалльных месторождений (табл. 1). В то же время, минералогические исследования золотосеребряных минеральных ассоциаций Федорово-Панской интрузии показали, что они обладают рядом специфических особенностей состава и генезиса в сравнении с другими мировыми аналогами.

Таблица 1

Содержания Au, Ag, металлов платиновой группы (г/т) и других рудогенных элементов (мас. %) в малообъемной технологической пробе платинометалльной руды месторождения Федорова тундра и в других месторождениях мира [3, 4]

Месторождение	Au	Ag	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os	Ni	Cu	S _{общ}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Федорово-Панский комплекс, месторождение Федорова тундра	0,14	0,35	0,36	1,45	0,027	0,064	0,004	<0,004	0,07	0,13	0,44
Норильск											
месторождение Октябрьское, малосульфидные руды	0,252	Н. д.	2,015	6,085	0,285	0,041	0,024	0,011	0,80	1,10	1,55
месторождение Норильск I, малосульфидные руды	0,16	0,70	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Бушвельд											
сульфидные руды Верхней зоны	0,47	Н. д.	0,73	0,90	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	0,15	0,96	2,26
Платриф, сульфидная минерализация в пегматитовых норитах	0,14	Н. д.	1,13	0,93	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	0,14	0,05	Н. д.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Интрузия Пеникат											
риф SJ	0,08	Н. д.	2,67	2,70	0,37	0,12	0,10	0,06	0,16	0,06	0,13
риф AP I	0,25	Н. д.	2,29	6,64	0,22	0,03	0,04	0,02	0,06	0,11	0,29
риф PV	0,27	Н. д.	3,91	2,32	0,09	0,11	0,08	0,05	0,24	0,25	0,79
Маргинальные серии блоков Суханко, Контиярви, риф SK интрузии Наркауc	0,13	Н. д.	0,38	1,54	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	0,08	0,18	Н. д.
Садбери, месторождение Ривер Вэлли	0,063	Н. д.	0,344	1,016	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	0,021	0,1	Н. д.
Апатитовые оливиниты Барановского месторождения	1,91	8,5	0,45	17,53	0,004	0,030	Н. д.	0,015	0,008	1,23	6,90

Примечание. Н. д. — нет данных.

Методика исследования

Минералого-геохимическое исследование золотосеребряных минеральных ассоциаций месторождений Федорово-Панской интрузии выполнено одновременно с изучением вещественного состава руд этих месторождений. Оно проведено по методике, разработанной и апробированной на малосульфидных платинометалльных рудах месторождений В. Чуарвы, Киевей, Федорова тундра и С. Каменник, принятых на государственный баланс по результатам геолого-разведочных работ 2001–2014 гг. [1, 2 и др.]. Используемая методика предполагает исследование минералов благородных металлов в естественных полированных образцах руд и пород, чем выгодно отличается от широко распространенных сейчас методов изучения минеральных зерен в раздробленном и предварительно обогащенном материале — протолочках и концентратах. Методика позволяет наблюдать минералы в естественных формах, размерах, ассоциациях и взаимоотношениях, не нарушенных никакими техногенными процессами.

Всего по месторождениям и рудопроявлениям изучено около 2000 аншлифов. По химическому составу диагностировано более 5600 зерен минералов платиновых металлов, золота и серебра; определены их размеры и микроассоциации. Для каждого месторождения дана количественная оценка распространенности различных благороднометалльных минералов.

Выполнено более 2000 SEM/EDS-анализов минералов благородных металлов, главных сульфидов, оксидов, силикатов и др. на SEM Leo-1450 с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром Bruker XFlash-5010 и программным обеспечением Quantax-200. Несколько сотен этих анализов продублированы на рентгеноспектральном микроанализаторе MS-46 Cameca с использованием стандартных методик и эталонов. Анализы рудных проб на благородные и цветные металлы, использованные в настоящей статье, сделаны в сертифицированных

лабораториях: Au, Pt, Pd — пробирный анализ с последующим определением методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой; Cu, Ni — атомно-абсорбционный анализ после кислотного разложения.

Геохимические особенности распределения золота и серебра в рудах

Во всех платинометалльных рудных объектах (месторождениях, рудопроявлениях, отдельных рудных телах и зонах) Федорово-Панской интрузии концентрации золота и серебра пространственно и генетически тесно связаны с сульфидной Cu-Ni-платинометалльной минерализацией. При очень больших объемах опробования (только на месторождении Федорова тундра отобрано и проанализировано более 100 тыс. проб более чем по 500 скважинам) ни разу не установлено факта наличия золотоносной зоны в отрыве от контуров платинометалльных руд.

Генетическое родство и единство золотосеребряной, платинометалльной и медно-никелевой ассоциаций отражается в тесных положительных корреляционных связях между всеми основными компонентами руд (рис. 1, 2). На представительной выборке установлены тесные положительные корреляционные связи содержаний Au со всеми рудогенными компонентами (коэффициент корреляции r , рис. 1): максимальные для Pt — 0,9 и Pd — 0,89; минимальные для Ni — 0,73, S — 0,76 и Cu — 0,77. Более низкие в сравнении с платиной и палладием коэффициенты корреляции золота с цветными металлами и серой является косвенным подтверждением отсутствия значимых концентраций Au в виде твердых растворов в рудообразующих сульфидах — пентландите, халькопирите, пирротине.

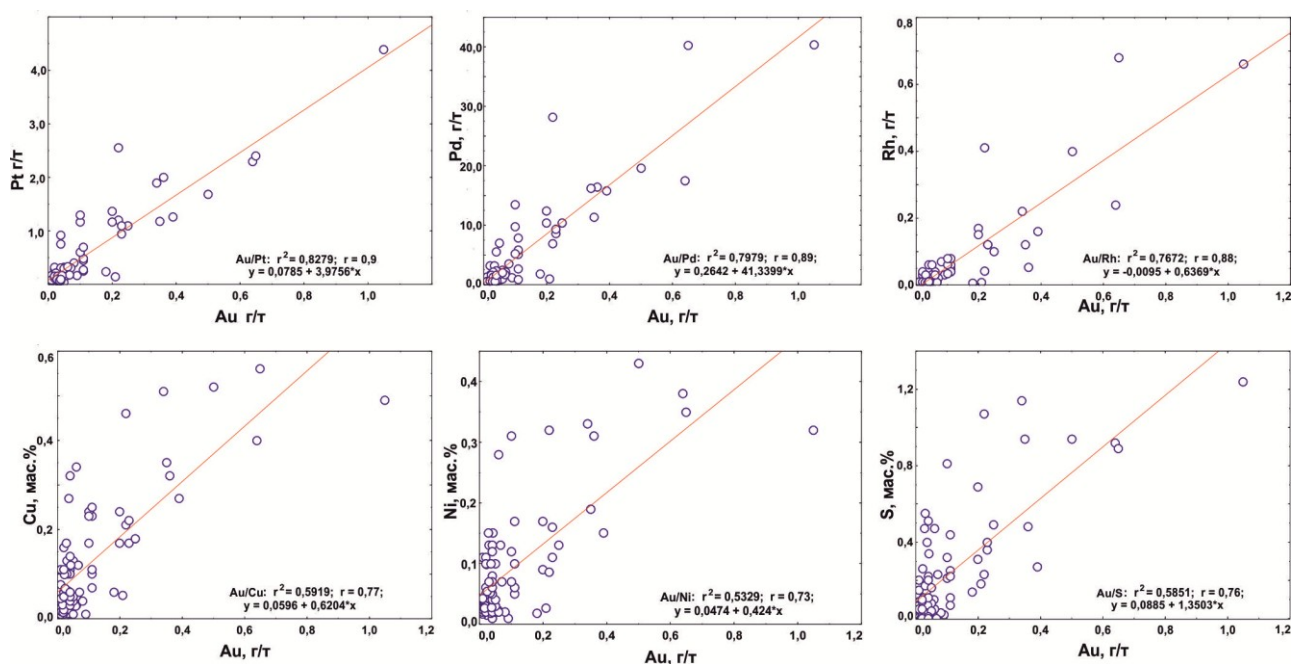


Рис. 1. Соотношения содержаний золота с основными рудогенными элементами в рудных анортозитах участка Ю. Пешемпахк, Западно-Панский массив; 80 рядовых керновых проб с содержанием $\sum Pt + Pd + Rh + Au \geq 0,5$ г/т. Здесь и на рис. 2 показаны направления и уравнения линейных трендов, величины достоверности аппроксимации (r^2), коэффициенты корреляции (r) между соответствующими компонентами

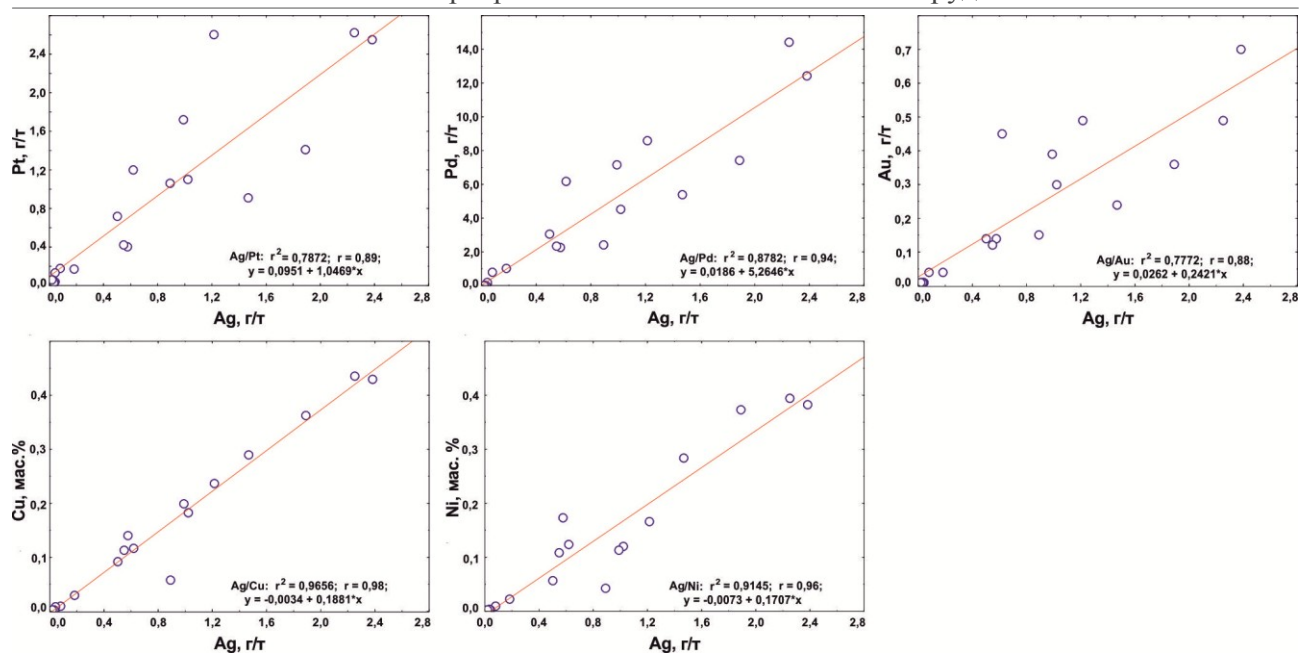


Рис. 2. Соотношения содержаний серебра с основными рудогенными элементами по рудному сечению скважины BG-N-126, месторождение С. Каменник, Западно-Панский массив; 20 рядовых керновых проб с содержанием $\sum Pt + Pd + Au \geq 0,05$ г/т

Корреляция содержаний Ag с рудогенными элементами еще более тесная (r , рис. 2): с Au — 0,88, Pt — 0,89, Pd — 0,94, Ni — 0,96, Cu — 0,98. Такой характер связей (см. выше про золото), напротив, свидетельствует о существенном вкладе в общий баланс твердых растворов Ag, как минимум, в халькопирите.

Исследование состава основных сульфидов из руд месторождения Федорова тундра методом лазерной абляции показало, что содержание Ag в халькопирите варьирует от десятых долей до первых граммов на тонну, достигая 1133,19 г/т [5], а максимальная концентрация растворенного в халькопирите золота, по тем же данным, только 0,029 г/т.

По тем же данным [5], в других главных рудообразующих сульфидах — пентландите и пирротине — содержания Au и Ag существенно ниже, г/т: 0,01–0,02 и 0,03–5,78 соответственно. Из этого следует, что только халькопирит способен обеспечить высокие, вплоть до промышленных концентрации серебра. Такой вывод становится очевидным исходя из того, что общее количество сульфидов в рудах разных месторождений Федорова-Панского комплекса обычно составляет 1–3 мас. %, а доля халькопирита варьирует от одной трети до половины общей сульфидной массы.

Минералы золота и серебра

В ранних публикациях, посвященных Au-Ag-минералам Федорова-Панского комплекса, отмечается не только их минералогическое значение, но и их важная промышленная роль в составе комплексного оруденения [6, 7, 8]. Изученный в настоящее время на представительных выборках приближенно-количественный минеральный состав платинометаллических руд Федорова-Панских месторождений приведен в табл. 2.

Распространенность минералов платиновых металлов (МПМ), золота и серебра (об. %) в рудах месторождений Федорово-Панского комплекса (по данным диагностики 5673 зерен SEM/EDS-методом)

МПМ и минеральные фазы	Федорова тундра	Киевей	С. Каменник	В. Чуарвы
1	2	3	4	5
Золото (Au,Ag,Pd)	0,9	1,1	0,6	0,2
Серебро (Ag,Au,Pd)	е. з.	е. з.	е. з.	–
Платина (Pt,Cu,Pd)	е. з.	–	–	–
Изоферроплатина (Pt,Pd) ₃ Fe	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Хонгшит(Pt,Pd)Cu	–	е. з.	е. з.	–
Палладий (Pd, Hg,Ag)	е. з.	–	–	–
Звягинцевит Pd ₃ Pb	–	е.з.	–	–
Рустенбургит Pt ₃ Sn	е. з.	е. з.	–	е. з.
Нигглиит PtSn	е. з.	-	–	е. з.
Паоловит(Pd,Au) ₂ Sn	1,7	е. з.	е. з.	е. з.
Атокит (Pd,Pt,Au) ₃ Sn	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Маратонит Pd ₂₅ Ge ₉ *	е. з.	–	–	–
Паларстанид Pd ₅ (Sn,As) ₂	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Куперит-брэггит (Pt,Pd,Ni)S	14,7	10,6	17,1	27,3
Маланит Cu(Pt,Ir) ₂ S ₄	–	е. з.	е. з.	–
Высоцкит (Pd,Pt,Ni)S	6,8	14,3	35,1	23,1
Лафламмеит Pd ₃ Pb ₂ S ₂	–	–	е. з.	–
КолдвеллитPd ₃ Ag ₂ S*	е. з.	–	е. з.	–
Лаурит (Ru,Os)S ₂	–	е. з.	е. з.	–
Платарсит (Pt,Rh,Ru)AsS	–	–	–	е. з.
Ирарсит (Ir,Ru,Rh,Pt)AsS	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Холлингвортит (Rh,Pt,Pd)AsS	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Сперрилит PtAs ₂	1,1	1,2	е. з.	13,1
Стиллуотерит Pd ₈ As ₃	4,7	1,0	е. з.	2,5
Палладоарсенид Pd ₂ As	е. з.	е. з.	е. з.	1,5
Меньшиковит Pd ₃ Ni ₂ As ₃	е. з.	–	е. з.	–
Винцентит (Pd,Pt) ₃ (As,Sb,Te)	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Атенеит (Pd,Hg) ₃ As	е. з.	–	е. з.	–
ТёрнрооситPd ₁₁ As ₂ Te ₂	е. з.	0.1	е. з.	–
Мертиит Pd ₁₁ (Sb,As) ₄	е. з.	е. з.	е. з.	е. з.
Мончеит (Pt,Pd)(Te,Bi) ₂	8.4	15,4	13,9	4,4
Кейтконнит Pd _{3-x} Te	е. з.	0,3	е. з.	0,5
Котульскит Pd(Te,Bi)	45,5	40,4	31,1	25,9

1	2	3	4	5
Меренскиит (Pd,Pt)(Te,Bi) ₂	10,6	13,1	0,9	0,5
Теллурупалладинит Pd ₉ Te ₄	—	е. з.	е. з.	е. з.
Соболевскиит PdBi	4,6	0,5	е. з.	—
Фрудит PdBi ₂	е. з.	—	—	—
Майченерит (Pd,Pt)BiTe	е. з.	е. з. (?)	—	—
Темагамит Pd ₃ HgTe ₃	е. з.	е. з.	—	е. з.
<i>Теларгпалит</i> (Pd,Ag) _{3+x} Te	е. з. (?)	0,5	е. з.	—
<i>Сопчеит</i> Ag ₄ Pd ₃ Te ₄	е. з.	0,5	е. з.	е. з.
<i>Луккулайсваарит</i> Pd ₁₄ Ag ₂ Te ₉	—	—	е. з.	е. з.
Без названия (Re,Cu,Pt)S ₂ ?	—	е. з.	—	—
Без названия Pd _{2-x} (Bi,Pb)(S,Se) (?)	е. з.	е. з.	—	—
<i>Без названия</i> Pd ₅ Ag(Pb,Bi)S ₂ (?)	—	е. з.	е. з.	—
<i>Без названия</i> (Pd,Ag) ₇ Se ₅ ?	—	—	е. з.	—
<i>Без названия</i> (Pd,Au) _{2+x} (As,Sn) (?)	е. з.	—	—	0,1
Без названия Pt ₅ Te ₇ ?	—	е. з. (?)	—	е. з.
Количество диагностированных зерен	1460	1015	1900	1298

Примечание. Курсивом выделены Au,Ag-содержащие минералы.

*Первая находка в России.

В рудах месторождений установлено 48 минералов и неназванных минеральных фаз элементов платиновой группы (далее — ЭПГ). Золото и серебро в видеобразующих количествах или в виде существенных изоморфных примесей (твердых растворов) содержится в 12 из них (в табл. 2 выделены курсивом).

Главным концентратом золота в рудах всех месторождений и рудопроявлений являются Au-Ag-сплавы. Их состав меняется от высокопробного золота — 5 ат. % Ag до серебра, обогащенного золотом, — 60 ат. % Ag (табл. 3, рис. 3, с). Нередко Au-Ag-сплавы содержат заметное количество палладия. По данным 114 SEM/EDS-анализов, среднее содержание Pd в золотосеребряных сплавах составляет 1,6 мас. % при вариациях от 0 до 19,5 мас. %.

В относительно распространенных станнидах — атоките и паоловите — примесь золота 0,2–18,2 мас. % является обычной (табл. 3). В редком и не установленном как самостоятельный минеральный вид арсениде с предполагаемой формулой (Pd,Au)_{2+x}(As,Sn) концентрации Au стабильно достигают 5,3–6,5 мас. %. Достаточно редко Au в количестве до десятых долей процента (по массе) встречается в Pt-Pd-сульфидах, Pt-Pd-арсенидах, Pt-Pd-висмито-теллуридах.

Характер распределения серебра по сравнению с золотом существенно отличается. Концентраты серебра более многочисленны, сложны и разнообразны (в порядке распространенности — табл. 2, рис. 3, а, б, в): аргентопентландит Ag(Fe,Ni)₈S₈ (типичный аксессуарный минерал сульфидных руд); Au-Ag-сплавы с примесями Pd, Cu, Fe; сложные теллуриды серебра и палладия — сопчеит, теларгпалит и луккулайсваарит; редкий сульфид Ag и

Pd — колдвеллит и неустановленные фазы $Pd_5Ag(Pb,Bi)S_2(?)$ и $(Pd,Ag)_7Se_5(?)$. По данным микронзондового анализа, серебро в количестве от десятых долей до 1 мас. % встречается в Pt-Pd-сульфидах (брэггит, высокоците), Pt-Pd-арсенидах (палладоарсениде, стиллуотерите), до 3 мас. % — в Pt-Pd-висмута-теллуридах (меренскиите, котульските, мончеите).

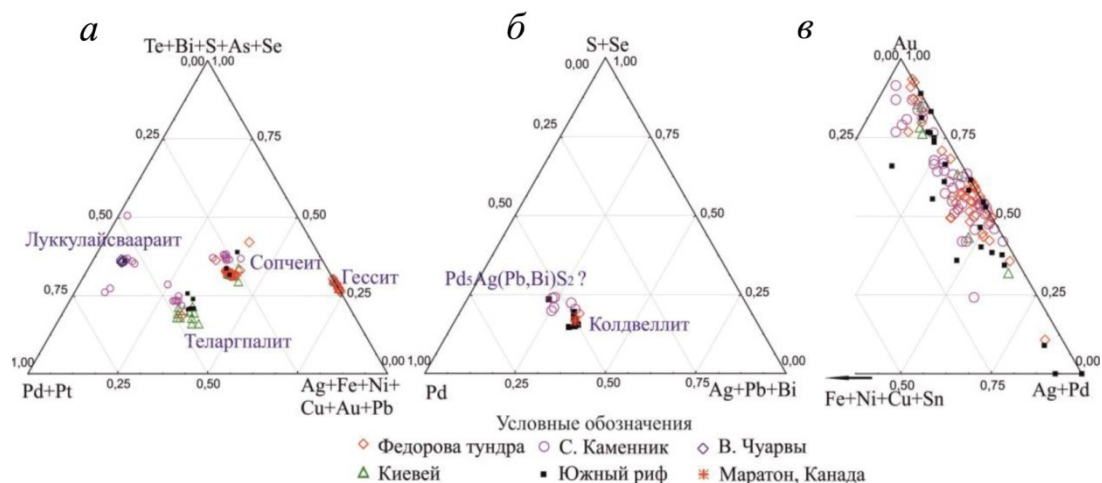


Рис. 3. Тройные диаграммы составов (ат. %) Ag-Pd-теллуридов (а), Ag-Pd-сульфидов (б) и Au-Ag-сплавов (в) из месторождений и рудопроявлений Федорово-Панского интрузивного комплекса и месторождения Маратон, Колдвелл, Канада (только для сульфидов)

Таблица 3

Микронзондовые и SEM/EDS(*) составы Au-Ag-содержащих минералов и маратонита из руд месторождений и рудопроявлений Федорово-Панского комплекса, мас. %

№ п/п	Минерал	S	Fe	Ni	Cu	Pd	Ag	Sn	Te	Pt	Au	Сумма
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1*	Pd-Hg-Ag-сплав	—	—	—	—	36,75	11,46	—	—	1,29	—	100,0 ¹
2	Au-Pd-Ag-сплав	—	0,04	0,03	1,25	1,90	0,46	—	—	—	96,24	99,46
3		0,10	0,36	—	0,23	3,48	0,78	—	—	—	93,65	98,60
4		0,26	0,20	0,03	0,25	1,44	1,69	—	—	—	95,22	99,09
5*		—	0,22	—	0,33	6,46	1,50	—	—	—	91,49	100,0
6	Au-Ag-сплав	0,36	0,38	0,30	0,07	—	12,37	—	—	—	86,30	99,77
7		—	—	—	—	—	13,17	—	—	—	84,97	98,14
8		0,23	0,54	—	0,06	0,30	16,20	—	—	—	82,39	99,72
9		—	—	—	—	2,76	10,88	—	—	—	81,61	95,25
10		0,37	0,20	0,14	0,13	—	18,74	—	—	—	79,39	98,97
11		—	0,19	—	—	0,45	19,79	—	—	—	78,71	99,14
12		0,20	0,72	—	1,16	—	22,08	—	—	—	74,93	99,09
13*		0,35	1,22	—	0,64	—	32,30	—	—	—	65,48	99,99

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14*	Ag-Au-сплав	–	0,28	–	–	–	42,64	–	–	–	57,08	100,0
15	Паоловит	–	2,15	–	–	–	–	–	–	4,89	1,07	99,99
16*	Атокит	0,20	1,56	–	–	49,03	–	23,16	–	18,17	7,87	99,99
17*	Паларстанид	–	0,68	0,10	–	66,32	–	21,45	2,18	–	1,82	100,01 ²
18	Сопчеит	0,21	0,18	0,03	–	24,85	32,89	–	41,32	0,21	–	100,42 ³
19*		–	1,12	–	0,48	24,23	32,97	–	41,19	–	–	99,99
20*	Теларгпалит	–	0,70	0,17	0,65	43,31	24,82	–	24,57	1,57	–	100,01 ⁴
21*	Луккулайсваарит	–	0,32	–	–	52,10	6,97	–	40,61	–	–	100,0
22*		–	1,39	0,56	0,32	50,05	7,27	–	40,42	–	–	100,01
23*		–	0,08	0,36	–	50,53	7,65	–	40,21	1,17	–	100,0
24*	Атенеит	–	1,32	0,37	0,09	69,82	–	–	–	–	2,10	100,0 ⁵
25	Колдвеллит	4,72	0,18	–	–	56,85	35,76	–	–	–	–	97,51
26*		5,73	–	–	–	57,13	37,14	–	–	–	–	100,0
27	Pd ₅ Ag(Pb,Bi)S ₂ (?)	7,41	0,21	–	–	56,28	11,95	–	–	–	–	99,57 ⁶
28*	(Pd,Ag) ₇ Se ₅ (?)	0,34	1,16	0,62	–	61,40	4,90	–	–	–	–	100,0 ⁷
29	(Pd,Au) _{2+x} (As,Sn) (?)	0,04	0,14	–	0,26	69,79	–	3,61	0,15	0,11	6,46	100,36 ⁸
30*		–	0,64	0,12	–	68,73	–	11,88	–	–	5,33	100,0 ⁹
31*	Маратонит	–	–	–	–	79,25	–	–	–	–	–	100,0 ¹⁰
32*		–	–	–	–	77,28	–	–	–	2,86	–	100,0 ¹¹

Примечания: 1. Верхними индексами обозначены элементы, включенные в сумму, мас. %: 1 — Hg (50,5); 2 — As (7,08), Hg (0,38); 3 — As (0,73); 4 — Bi (2,83), Pb (1,39); 5 — As (18,02), Hg (8,28); 6 — Pb (23,48); 7 — Se (31,58); 8 — As (19,8); 9 — As (13,3); 10 — Hg (0,38), Pb (0,7), Ge (19,67); 11 — Ge (19,86).

2. Месторождения и рудопроявления (анализы): Федорова тундра — 1, 7, 9, 11, 15, 18, 26, 31, 32; Ю. Пешемпахк — 2; В. Чуарвы — 3, 4, 8, 21, 29; С. Каменник — 5, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 24, 28, 30; С. Пешемпахк — 6, 12; Предгорный — 10; Ю. Киевей — 23, 25, 27.

3. Прочерк — элемент не обнаружен.

Кроме указанных в табл. 2 и аргентопентландита, концентраторами серебра в составе руд являются также крайне редкие акантит Ag₂S, агвиларит Ag₄SeS, науманнит Ag₂Se и гессит Ag₂Te. Незначительная примесь (0,5 мас. % Ag) установлена в талкусите Tl₂(Cu,Fe)₄S₄.

Из-за крайней редкости и слабой изученности луккулайсваарит Pd₁₄Ag₂Te₉ и колдвеллит Pd₃Ag₂S из рудных зон Федорова-Панского комплекса заслуживают особого упоминания. Находка луккулайсваарита является второй в России и мире после его открытия в 2014 г. в интрузии Луккулайсваара в Карелии [9]. Первая и единственная до сих пор находка колдвеллита была сделана также в 2014 г. в металлургическом концентрате месторождения Маратон [10] (The Marathon Deposit, Coldwell Complex, Ontario, Canada). До его обнаружения в Южном рифе Западно-Панского массива в природной ассоциации этот минерал известен не был. В ассоциации с колдвеллитом впервые в России установлен природный германид палладия — маратонит Pd₂₅Ge₉, открытый в Канаде в 2016 г. там же, где и колдвеллит (The Marathon Deposit, Coldwell Complex, Ontario, Canada) [11].

В Федорово-Панском комплексе луккулайсваарит обнаружен в рудных габброноритах и анортозитах на месторождениях С. Каменник, В. Чуарвы и рудопроявлении Ю. Киевей. Образует выделения размерами до первых десятков микрометров в пентландит-пирротин-халькопиритовых и пентландит-миллерит-халькопиритовых (\pm борнит) сульфидных вкрапленниках в ассоциации с Pt-Fe-сплавом, брэггитом, висоцкитом, мончеитом, котульскитом, сопчеитом, теларгпалитом (рис. 4, f). Состав минерала близок к стехиометрии (рис. 3, a, табл. 3).

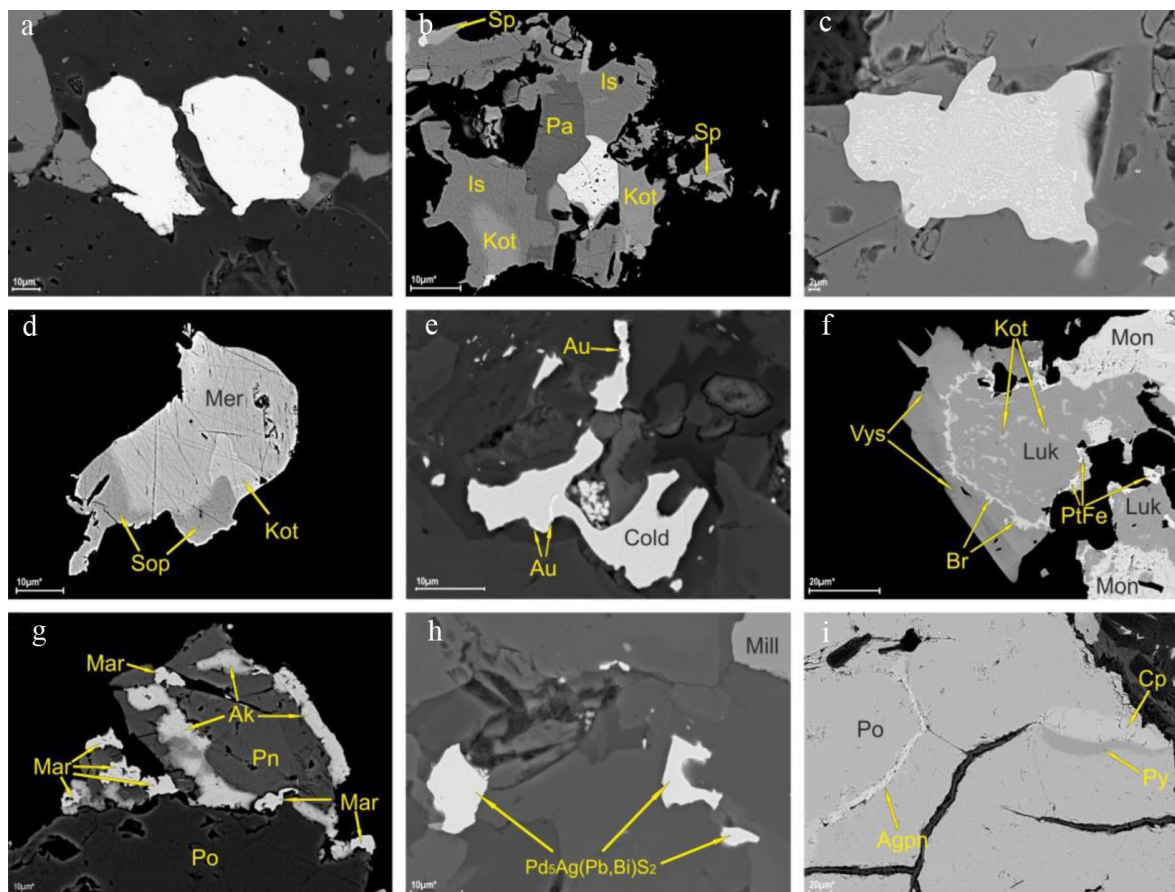


Рис. 4. Минералы-концентраты Au и Ag (морфология, микроассоциации, взаимоотношения, SEM-фото):
 а — выделения самородного золота (белое) среди неравномернoзернистых сульфидов (серое), рудный анортозит, Киевей; б — сложный комплексный сросток самородного золота (белое), котульскита (Kot), палладоарсенида (Pa), мертиита (Is) и сперилита (Sp), рудное габбро, С. Каменник; в — тонкая эмульсионная структура распада твердого раствора самородного золота (белое) в паоловите (светло-серое), серое — пентландит, рудный габбронорит, Федорова тундра; д — сопчеит (Sop) в сростании с котульскитом (Kot) и меренскиитом (Mer), рудный габбронорит, С. Каменник; е — ксеноморфные зерна колдвеллита (Cold) с тонкими прожилковидными обособлениями золота (Au), рудный анортозит, Ю. Киевей; ф — комплексный сросток луккулайсваарита (Luk), мончеита (Mon), котульскита (Kot), брэггита (Br), висоцкита (Vys) и Pt-Fe-сплава (PtFe), рудный габбронорит, В. Чуарвы; г — прерывистые каймы, образованные ксеноморфными зернами маратонита (Mar) и агрегатами зерен акантита (Ak), вокруг Pd-содержащего пентландита (Pn), Po — пирротин, рудный габбронорит, Федорова тундра; h — группа зерен сложного сульфида Pd, Ag и Pb во вторичных силикатах вблизи миллеритового (Mill) вкрапленника, рудный анортозит, Ю. Киевей; i — каемчатое обособление аргентопентландита (Agpn) на границах зерен пирротина (Po), Py — пирит, Cp — халькопирит, рудный габбронорит, С. Каменник

Колдвеллит в рудных анортозитах рудопроявления Ю. Киевей образует несколько самостоятельных зерен сложной морфологии с включениями самородного золота (рис. 4, е) среди вторичных силикатов вблизи крупных сульфидных борнит-миллерит-халькопиритовых вкрапленников. Кроме уже названных, в ассоциации с ним обнаружены Pt-Fe-сплав, звягинцевит, высокоцит, сперрилит, тёрнроосит, мончеит, кейтконнит, сфалерит.

В образце рудного габбронорита с Федоровой тундры несколько зерен колдвеллита размером до 10–15 мкм обнаружены в сложной ассоциации с пирротинитом, троилитом, пентландитом, халькопиритом, кубанитом, аргентопентландитом, акантитом, Pt-содержащим таркианитом $(\text{Cu,Fe})(\text{Re,Mo})_4\text{S}_8$, Au, Ag-сплавами, хонгшитом, маратонитом, паоловитом, атоцитом, брэггитом, сперрилитом, мончеитом, котульскитом, соболевскитом, сопчеитом, теллуropалладинитом.

Химический состав колдвеллита изучен SEM/EDS- и микрозондовым методами, и в изученных образцах близок к теоретическому (табл. 3).

Маратонит из ассоциации с колдвеллитом показан на рис. 4, г. В другом образце руды (Федорова тундра) он образует мелкие (1–2 мкм) каемчатые обособления на краю мончеит-паоловитового сростка в халькопирите. Состав маратонита изучен SEM/EDS-методом и близок к теоретическому (табл. 3).

Морфологические особенности и микроассоциации других золотосеребряных минералов показаны на рис. 4. Минералы расположены как в сульфидах, так и в силикатах, особенно часто в сложных сростаниях с минералами ЭПГ (рис. 4, b, d, f), образуют зерна различной морфологии: ксено-, гипидиоморфные, каплевидные, просечки и каймы размерами от долей до первых сотен микрометров. Нередки также и структуры распада твердого раствора, например, самородного золота в станнидах Pd (рис. 4, c).

Обсуждение результатов и выводы

Макро- и микроморфологические особенности сульфидного Cu-Ni-платинометаллического оруденения в интрузиях Федорово-Панского комплекса, микроассоциации платиноидов с первично-магматическими сульфидами и силикатами, обилие структур распада твердых растворов в рудных минералах (пирротин-троилит, пламенеvidный пентландит, халькопирит-кубанит, скелетные выделения высокоцита в пентландите и др.) — все это признаки позднемагматического генезиса вкрапленных малосульфидных руд [1–3]. Равновесные генетические взаимоотношения золотосеребряных сплавов и других Au-Ag-содержащих минералов с вмещающими их сульфидами и платиноидами в большинстве случаев являются свидетельством того, что и золотосеребряные минералы, и минералы платиновых металлов принадлежат единой благороднометаллической минеральной ассоциации, сосуществующей с первично-магматическими вкрапленными Cu-Ni-Fe-сульфидами в краевых и рифовых зонах интрузий Федорово-Панского комплекса.

Ранее было показано [1, 2 и др.], что все главные минералы ЭПГ могли кристаллизоваться в высокотемпературных позднемагматических условиях (1100–500 °C) непосредственно из сульфидного расплава и остаточного газово-жидкого флюида после кристаллизации главных сульфидных минералов и одновременно с ними. Процессы относительно низкотемпературного (800–350 °C) постмагматического перераспределения благородных и цветных металлов, в т. ч. и золота с серебром, в режиме высокой активности летучих (Cl, H₂O, CO₂ и др.) в условиях

становления Федорово-Панских рудоносных интрузий проявились в очень ограниченных масштабах. Это существенно отличает рассмотренную минерализацию от Au-Ag-минерализации Норильских интрузий. Последняя, несмотря на схожесть минерального состава с Федорово-Панской, согласно современным данным [4, 12], формировалась в постмагматических низкотемпературных условиях (350–50 °С) в результате гидротермально-метасоматического и пневматолитового перераспределения Au и Ag из первично-магматических сульфидных руд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геология и вещественный состав руд малосульфидного платинометалльного месторождения Северный Каменник в Западно-Панском массиве (Кольский полуостров, Россия) / А. У. Корчагин [и др.] // Руды и металлы. 2016. № 1. С. 42–51.
2. Субботин В. В., Корчагин А. У., Савченко Е. Э. Платинометалльная минерализация Федорово-Панского рудного узла: типы оруденения, минеральный состав, особенности генезиса // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 1. С. 55–66.
3. *Haldrup A. Дж.* Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003.
4. *Sluzhenikin S., Mokhov A.* Gold and silver in PGE-Cu-Ni and PGE ores of the Noril'sk deposits, Russia // *Miner Deposita*. 2015. 50: 465–492.
5. Особенности распределения благородных металлов в сульфидных парагенезисах месторождения Федорова тундра (Кольский полуостров) / А. Ф. Митрофанов [и др.] // ДАН. 2013. Т. 451, № 6. С. 676–679.
6. Золотосодержащие теллуриды платиноидов и палладистое золото в габброноритах Панского массива на Кольском полуострове / А. П. Кривенко [и др.] // ДАН. 1991. Т. 319, № 3. С. 725–729.
7. Минералы серебра в расслоенном интрузивном комплексе Федорово-Панских тундр, Кольский полуостров / М. З. Абзалов [и др.] // ДАН. 1993. Т. 329, № 4. С. 497–499.
8. Толстых Н. Д., Кривенко А. П. О составе теларгпалита // ДАН. Т. 341, № 5. 1995. С. 666–668.
9. Lukkulaivaaraite, Pd₁₄Ag₂Te₉, a new mineral from Lukkulaivaara intrusion, northern Russian Karelia, Russia / A. Vymazalová [et al.] // *Mineralogical Magazine*. 2014. December, Vol. 78(7). P. 1743–1754.
10. Coldwellite, Pd₃Ag₂S, a new mineral species from the Marathon deposit, Coldwell complex, Ontario, Canada / A. M. McDonald [et al.] // *The Canadian Mineralogist*. 2016. Vol. 53. P. 1–13.
11. Marathonite, IMA 2016-080 / A. M. McDonald [et al.] // *CNMNC Newsletter*. 2016. December, No. 34. P. 1320; *Mineralogical Magazine*: 80: 1315–1321.
12. Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах / Э. М. Спиридонов [и др.] // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 5. С. 445–476.

Сведения об авторах

Субботин Виктор Владимирович — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Геологического института КНЦ РАН

E-mail: sub@geoksc.apatity.ru

Габов Дмитрий Александрович — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: gabov_da@mail.ru

Корчагин Алексей Урванович — кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Геологического института КНЦ РАН

E-mail: korchagin@geoksc.apatity.ru

Савченко Евгений Элланович — ведущий электроник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

Author Affiliation

Victor V. Subbotin — PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: sub@geoksc.apatity.ru

Dmitriy A. Gabov — PhD (Geology and Mineralogy), Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: gabov_da@mail.ru

Alexey U. Korchagin — PhD (Geology and Mineralogy), Head of Laboratory of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: korchagin@geoksc.apatity.ru

Eugene E. Savchenko — Leading Electronic Engineer of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: evsav@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

Золото и серебро в составе платинометаллических руд Федорово-Панского интрузивного расслоенного комплекса / *В. В. Субботин [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 1 (9). — С. 53–65.

Reference

Subbotin Victor V., Gabov Dmitriy A., Korchagin Alexey U., Savchenko Eugene E. Gold and Silver in the Composition of PGE Ores of the Fedorov-Pana Layered Intrusive Complex. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1 (9), pp. 53–65 (In Russ.).

УДК 620.98:621.039

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Н. Н. Мельников, С. А. Гусак, В. А. Наумов
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

Аннотация

Труднодоступные регионы Российской Арктики, где сконцентрированы основные национальные ресурсы полезных ископаемых России, испытывают острый недостаток энергии для их развития. Несмотря на исключительную привлекательность уникальных месторождений золота, цветных и редкоземельных металлов, практическое отсутствие или слабо развитая энергетическая инфраструктура является одной из главных причин, по которым перспективные проекты освоения этих месторождений до сих пор остаются нереализованными. В настоящей статье кратко рассмотрены направления развития энергетической инфраструктуры труднодоступных и удаленных территорий арктических регионов. Основное внимание уделяется атомным станциям малой мощности (АСММ), которые рассматриваются в качестве альтернативных источников энергии. Кратко представлены результаты оценки отдельных аспектов безопасности АСММ, и приведены основные результаты исследований, которые характеризуют возможности повышения уровня безопасности атомных энергоисточников при их подземном размещении.

Ключевые слова:

атомные станции малой мощности, реакторные установки, энергоснабжение, арктические регионы России.

USE OF SMALL NUCLEAR POWER PLANTS FOR POWER SUPPLY OF THE ARCTIC SOLID MINERAL DEPOSITS

Nikolay N. Melnikov, Sergey A. Gusak, Vadim A. Naumov
Mining Institute of the KSC of the RAS

Abstract

Inaccessible regions of the Russian Arctic, containing main national mineral resources, are experiencing acute shortage of energy, required for the development. Despite the critical appeal of the unique gold, non-ferrous and rare earth metals deposits, underdeveloped or almost absent energy infrastructure is one of the main reasons why promising projects for the deposits development have not been yet implemented. The paper outlines the trends of the energy infrastructure development in inaccessible and remote areas of the Arctic regions. Particular attention is given to the small nuclear power plants (SNPP) which are considered as alternative energy sources. Results on evaluation of certain aspects of SNPP safety are briefly given and main study results are reported which characterize possibilities of raising a safety level of nuclear energy sources under their underground placement.

Keywords:

small nuclear power plants, reactor units, power supply, Russian Arctic regions.



Введение

Инновационное развитие арктических регионов России, о котором сейчас так много дискутируют, требует тесного взаимодействия государства, бизнеса и науки. Обязательным условием реальной инновационной политики в сферах, которые характеризуются недостаточной

инвестиционной деятельностью, является целенаправленная концентрация усилий государства. В настоящее время именно к таким сферам следует отнести освоение месторождений большинства видов твердых полезных ископаемых в арктических регионах России, где решающее значение приобретает проблема энергообеспечения вновь создаваемых горнопромышленных предприятий.

Актуальность проблемы энергоснабжения при освоении перспективных месторождений, связанной с отсутствием или недостаточным развитием энергетической инфраструктуры, в наибольшей степени проявляется на удаленных и труднодоступных территориях восточных арктических регионов России, которые расположены в зонах децентрализованного энергоснабжения. Для энергетической инфраструктуры таких регионов характерно следующее: наличие множества обособленных энергоузлов, разрозненность потребителей энергоресурсов, северный завоз органического топлива. Северный завоз является отдельной проблемой, которая определяет энергетическую безопасность удаленных и труднодоступных территорий. При осуществлении этой дорогостоящей процедуры доля транспортной составляющей в структуре стоимости топлива может достигать 70 %, что обуславливает высокую себестоимость производства энергии — в 5–10 раз выше, чем на электростанциях локальных энергоузлов. Ежегодные субвенции на выравнивание тарифов, предоставляемые из бюджетов различных уровней, оцениваются в несколько десятков миллиардов рублей, что составляет в некоторых регионах до 20–30% от расходов бюджета [1, 2]. В качестве примера приведем результаты исследований, выполненных специалистами Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова с целью количественной оценки надежности топливо- и энергообеспечения отдельных районов Якутии [3]. Эти исследования проводились на основе индикативного метода анализа энергетической безопасности территорий регионального уровня, сущность которого заключается в определении степени кризисности состояния энергетической безопасности (нормальная, предкризисная или кризисная) путем сравнения индикативных показателей, рассчитанных для изучаемого объекта, с их пороговыми значениями. В обобщенном виде их результаты иллюстрирует рис. 1, на котором приведено районирование территории Якутии по степени обеспеченности электрической и тепловой энергией и всеми видами топлива.

Как видно из рис. 1, все арктические районы Якутии в части обеспеченности топливом относятся к территориям с кризисной ситуацией, которая обусловлена, прежде всего, сильной зависимостью энергоизолированных районов от внешних поставщиков дизельного топлива.

Указанный фактор, характерный для децентрализованной зоны энергетического комплекса Якутии, определяет специфику республиканской тарифной политики — перекрестное субсидирование населения, которое заключается в распределении высоких тарифов дизельной энергетики между остальными потребителями в централизованной зоне, в основном промышленного сектора. Такая тарифная политика вынуждает потребителей промышленного сектора строить собственные генерирующие мощности, что негативным образом сказывается на инвестиционной привлекательности, развитии энергетики и на энергетической безопасности всей республики [3].

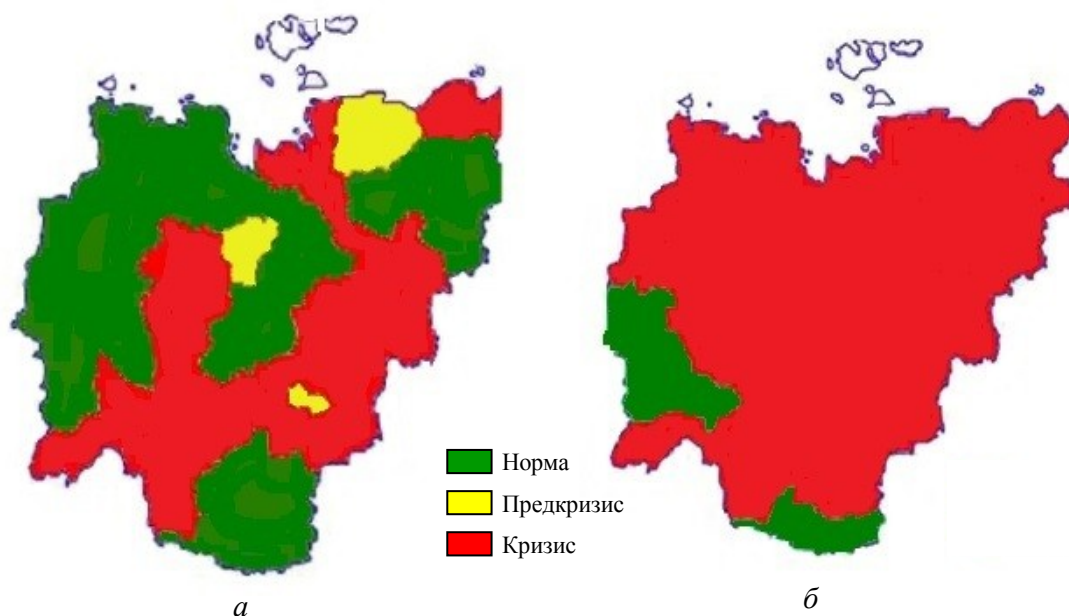


Рис. 1. Карты районирования субъектов Республики Саха (Якутия) по обеспеченности электрической и тепловой энергией (а) и топливом (б) [3]

Аналогичная ситуация свойственна большинству территорий в зонах децентрализованного энергоснабжения, характеризующихся суровым климатом, тяжелыми условиями, высокой стоимостью доставки топлива и грузов, удаленностью от центров снабжения. Поэтому в рамках мероприятий, предусмотренных Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации, развитие энергетической инфраструктуры арктических регионов России, в том числе на основе использования возобновляемых и альтернативных источников энергии, рассматривается в качестве одной из приоритетных задач [4].

Направления развития энергетической инфраструктуры арктических регионов России

Региональные стратегические и программные документы, направленные на развитие энергетической инфраструктуры арктических регионов, предусматривают строительство объектов малой энергетики, которой отводится определяющая роль в обеспечении энергетической безопасности удаленных и труднодоступных территорий. Планируется, что решение этой задачи будет базироваться в основном на применении традиционных энергоисточников, работающих на углеводородном топливе, и возобновляемых источников на основе гибридных (ветродизельных) электростанций. В качестве альтернативных

энергоисточников в системе локальной энергетики для энергоснабжения арктических месторождений полезных ископаемых рассматриваются атомные станции малой мощности (АСММ).

Исследования по обоснованию различных вариантов развития энергоснабжения децентрализованной зоны восточных регионов России ведутся с 1980-х гг. в Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения РАН. На основе выполненных исследований были определены приоритетные направления развития локальной энергетики и сформулированы условия их конкурентоспособности по сравнению с традиционной схемой «дизельная электростанция (ДЭС) + котельная», которая рассматривается как отдельная схема энергоснабжения, когда электрической энергией потребитель обеспечивается от дизельной электростанции, а тепловой — от котельной [1, 5, 6].

Кратко представляя результаты этих исследований, можно отметить вывод о том, что для промышленных потребителей восточного арктического сектора как существующих, так и новых, ориентированных на автономное энергоснабжение, более целесообразно использовать когенерационную схему (комбинированное обеспечение электрической и тепловой энергией от одного источника). Использование в качестве такого энергоисточника мини-ТЭЦ на местных видах топлива — угле или природном газе локальных месторождений является довольно капиталоемким вариантом. Однако себестоимость производства электроэнергии на них в два раза ниже, чем на дизельных электростанциях, что позволяет рекомендовать этот вариант для потребителей, расположенных вблизи месторождений угля и газа. В буферной зоне трасс газопроводов, кроме того, эффективен перевод ДЭС на природный газ и с использованием оборудования с когенерацией тепла. Результаты исследований по определению зон экономической целесообразности использования газа на дизельных электростанциях свидетельствуют о достаточно высокой эффективности этого мероприятия.

Проведенный сравнительный анализ технико-экономических показателей проектов возобновляемых источников энергии показал, что данные проекты для промышленных потребителей характеризуются значительными энергетическими нагрузками и пока не являются коммерчески привлекательными.

Для новых горнопромышленных предприятий, которые предполагается размещать в арктических регионах, где отсутствует энергетическая инфраструктура, в качестве альтернативы традиционному варианту следует рассматривать строительство АСММ [5]. Условия эффективности АСММ по сравнению с условиями традиционной схемы «ДЭС + котельная», полученные авторами рассматриваемых исследований, приведены в работе [6].

На основе многофакторного анализа транспортной и энергетической инфраструктуры в труднодоступных районах специалистами вышеупомянутого института были определены первоочередные проекты использования АСММ при освоении перспективных месторождений полезных ископаемых в арктических регионах:

- медно-порфировое месторождение «Песчанка» в Чукотском автономном округе;
- Томторское месторождение ниобий-редкоземельных руд и месторождение рудного золота «Кючус» в Якутии.

Кроме того, использование АСММ в качестве альтернативного энергоисточника рассматривается и для горнодобывающего предприятия по добыче и переработке свинцово-цинковых руд Павловского месторождения на арх. Новая Земля [7].

Возможность использования АСММ для энергоснабжения перспективных месторождений твердых ископаемых в труднодоступных районах нашла свое отражение и в региональных программах, которые предусматривают мероприятия, направленные на развитие автономной энергетики в децентрализованных зонах энергоснабжения [8, 9].

Исходя из анализа перспективных электрических нагрузок предприятий на указанных месторождениях, которые варьируются от 20 до более чем 200 МВт, можно выделить два диапазона требуемой единичной мощности атомных энергоблоков [5]:

- 6–12 МВт для электроснабжения изолированных потребителей с уровнем электрической нагрузки 6–30 МВт;
- 50–100 МВт для организации энергоснабжения крупных потребителей и/или для работы в энергосистеме.

Анализ современного состояния российских разработок реакторных установок малой мощности, рассматриваемых в работе руководителя рабочей группы Росатома по отбору предложений для реализации атомных станций малой мощности Е. О. Адамова [10], позволяет сделать вывод о том, что для покрытия перспективных нагрузок потенциальных потребителей могут быть созданы АСММ в широком энергетическом диапазоне.

Энергетическая потребность объектов, обуславливающая целесообразность и объем использования атомных энергоисточников, является одним из основных критериев в широком спектре разнообразных факторов, которые в совокупности определяют конкурентоспособность и инженерно-техническую возможность использования АСММ для энергоснабжения того или иного конкретного потребителя. Анализ таких факторов и соответствующих требований к атомным энергоисточникам является предметом самостоятельной работы. В настоящей статье кратко рассмотрим некоторые аспекты безопасности АСММ.

Аспекты безопасности АСММ

Несомненно, важнейшим требованием к АСММ, которые могут быть использованы для энергоснабжения при освоении и разработке месторождений полезных ископаемых, является обеспечение гарантированного уровня ядерной и радиационной безопасности. Повышение безопасности атомных станций — ключевая задача в решении проблемы развития атомной отрасли в целом. Вместе с тем, фактор безопасности таких объектов приобретает особое значение в контексте использования АСММ в арктических регионах с возможностью размещения атомных энергоисточников вблизи от потребителей энергетической продукции. С этой точки зрения реакторные установки малой мощности обладают потенциалом для существенного улучшения в области безопасности по сравнению с большой атомной энергетикой. Современные разработки проектов АСММ, направленные на снижение требований к защитным мерам за пределами площадки и уменьшение радиуса защитной зоны вокруг станции, базируются на конструктивных и инженерно-технических решениях, среди которых выделим следующие [11, 12]:

- снижение последствий потенциальных выбросов вследствие меньшей топливной загрузки активных зон реакторов, меньшей запасенной неядерной энергии и меньшей суммарной мощности остаточного энерговыделения;
- применение преимущественно многократно резервированных пассивных систем безопасности;

- модульно-блочная структура реакторных установок, основанная на интегральной компоновке первого контура.

Указанные решения, направленные на повышение уровня безопасности, реализуются практически во всех современных российских разработках атомных станций малой мощности, которые основаны на многолетнем опыте проектирования и эксплуатации судовых реакторных установок, сформировавшем потенциал отечественных реакторных технологий в области создания АСММ. Не затрагивая другие аспекты безопасности атомных станций, которые должны отвечать нормативным документам, регламентирующим проектирование, строительство и эксплуатацию таких объектов, остановимся на требованиях к обеспечению безопасности при сейсмических воздействиях природного характера.

Требования к обеспечению безопасности при землетрясениях

Согласно требованиям «Норм проектирования сейсмостойких атомных станций» [13], атомная станция должна обеспечивать безопасность при сейсмических воздействиях до максимального расчетного землетрясения (МРЗ) включительно и выработку (выдачу) энергетической продукции вплоть до уровня проектного землетрясения (ПЗ) включительно. При этом ПЗ определяется как землетрясение максимальной интенсивности на площадке станции с повторяемостью один раз в 1 000 лет, а МРЗ — как землетрясение максимальной интенсивности на площадке атомного объекта с повторяемостью один раз в 10 000 лет. На первой стадии разработки ТЭО (обоснование инвестиций) сейсмичность района размещения атомной станции допускается принимать на основе комплекта карт общего сейсмического районирования территории РФ ОСР-97, которые позволяют оценивать степень сейсмической опасности на различных уровнях, отражающих расчетную интенсивность сейсмических сотрясений в баллах шкалы MSK-64, ожидаемую на данной площадке с заданной вероятностью в течение 50 лет [14, 15]. В соответствии с нормативным документом [13], сейсмичность района размещения атомной станции для средних грунтов может оцениваться:

- для проектного землетрясения — по карте ОСР-97-В, которая соответствует 5 %-й вероятности превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет (период повторяемости сотрясений (T) — один раз в 1 000 лет);

- для максимального расчетного землетрясения — по карте ОСР-97-Д, которая соответствует 0,5 %-й вероятности превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет ($T = 10\,000$ лет).

В 2009–2012 гг. в ОАО «Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве», являющемся ведущим отраслевым предприятием в России в области инженерных изысканий в строительстве, с участием Института физики Земли РАН и специалистов других академических и ведомственных учреждений была выполнена работа, целью которой являлось создание комплекта актуализированных карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2012, предназначенного для замены действующих уже свыше 15 лет нормативных карт ОСР-97 (предыдущие карты ОСР территории СССР традиционно обновлялись в среднем каждые 10 лет). После опубликования макетов карт ОСР-2012 и широкого их обсуждения научной общественностью стала очевидна необходимость их дальнейшего совершенствования, которое продолжалось в течение 2013–

2015 гг. и завершилось созданием макетов карт ОСР-2016, основанных на модифицированной базе исходных данных ОСР-2012 и ОСР-2014, дополненных территорией Крыма, характеризующейся высокой сейсмической активностью. Созданный в результате работ 2014–2015 гг. комплект актуализированных карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016 предлагается в качестве нормативного документа для осуществления сейсмостойкого строительства взамен действующих с 1997 г. карт ОСР-97 [16]. Согласно новому комплекту карт ОСР-2016, сейсмичность района размещения атомной станции может оцениваться на основе карт, отражающих расчетную интенсивность сейсмического воздействия с заданной вероятностью для объектов атомной отрасли в соответствии с комплектом карт ОСР-97 и нормативными требованиями [13]:

- для проектного землетрясения — по карте ОСР-2016-B;
- для максимального расчетного землетрясения — по карте ОСР-2016-D.

На рис. 2 и 3 приведены фрагменты соответствующих карт, иллюстрирующих сейсмическое районирование Якутии и Чукотского АО. Эти рисунки позволяют предварительно оценить прогнозируемый уровень сейсмической опасности в районах расположения рассматриваемых месторождений полезных ископаемых и интенсивность ПЗ и МРЗ в соответствии с требованиями нормативного документа [13].

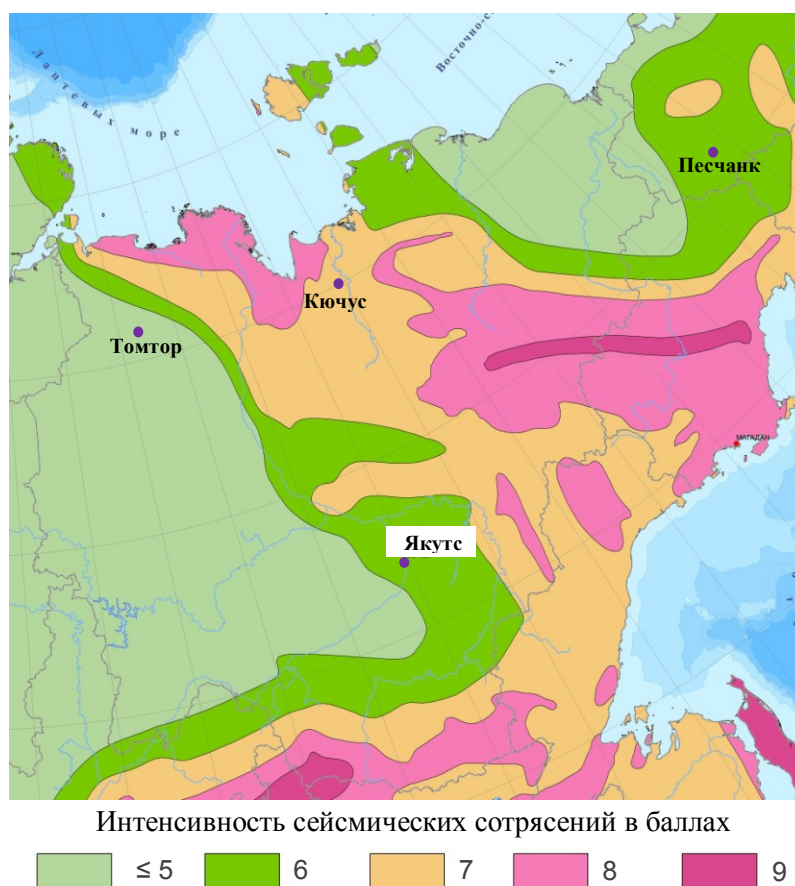


Рис. 2. Сейсмическое районирование Якутии и Чукотского АО для оценки интенсивности ПЗ в районе размещения атомной станции (фрагмент карты ОСР-2016-B [16])

Проектные решения по сейсмостойкости АСММ, которые могут быть размещены в районе месторождения «Песчанка» в Чукотском АО, должны обеспечивать выработку энергетической продукции при сейсмических воздействиях, которые характеризуются интенсивностью в 6 баллов по шкале MSK-64. При этом ядерная и радиационная безопасность атомного энергоисточника должна быть обеспечена при интенсивности сейсмических воздействий вплоть до 8 баллов.



Рис. 3. Сейсмическое районирование Якутии и Чукотского АО для оценки интенсивности МРЗ в районе размещения атомной станции (фрагмент карты ОСР-2016-D [16])

Для АСММ, размещаемых на месторождениях «Томтор» и «Кючус», интенсивность проектного землетрясения составляет 5 и 7 баллов соответственно. Сейсмическое воздействие, которое характеризуется интенсивностью МРЗ в этих районах, оценивается на уровне 6 и 8 баллов для Томторского и Кючусского месторождений соответственно.

В сейсмическом отношении территория арх. Новая Земля стабильна. В геологической истории новейшего периода отсутствуют признаки современной тектонической активности. Согласно комплекту карт ОСР-2016, прогнозируемая интенсивность проектного землетрясения в районе Павловского месторождения прогнозируется на уровне 5 баллов, а интенсивность максимального расчетного землетрясения не превышает 7.

Отметим, что карты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации могут быть использованы для предварительного уточнения сейсмичности района размещения атомной станции с учетом грунтовых условий площадки и их возможных

изменений в процессе строительства и эксплуатации объекта. Окончательно сейсмичность площадки атомной станции должна определяться по результатам сейсмического микрорайонирования [13].

В заключение также необходимо отметить, что инновационные проекты АСММ для освоения арктических месторождений в подавляющем большинстве базируются на многолетнем опыте проектирования и эксплуатации судовых реакторных установок, позволяющем обеспечить сейсмостойкость атомного энергоисточника до 9 баллов по шкале MSK-64.

Повышение безопасности при подземном размещении атомных энергоисточников

Использование АСММ в качестве автономных источников энергии и необходимость их приближения к потребителям энергии, особенно в удаленных и труднодоступных районах, обуславливают дополнительные требования по снижению рисков радиационного воздействия атомных энергоисточников на окружающую среду и население. В совокупности с барьерами безопасности, которые предусматриваются в современных разработках реакторных установок, комплексная безопасность, включая локализацию последствий аварий, решение задачи физической защиты и защиты от внешних воздействий техногенного и природного характера, может быть гарантированно обеспечена при подземном размещении реакторных установок.

В конце 1980-х и начале 1990-х гг. Горный институт Кольского научного центра РАН при сотрудничестве с ведущими научно-исследовательскими, проектно-конструкторскими и технологическими организациями страны выполнил комплексные научно-исследовательские работы, направленные на обоснование концепции создания в СССР головных подземных атомных станций в рамках Государственной научно-технической программы «Экологически чистая энергетика». Основные результаты этих НИР опубликованы в работах [17–19]. Ниже приведены некоторые результаты, характеризующие потенциальные преимущества подземного размещения атомных станций.

В рамках исследований по безопасности, наряду с типичными внешними событиями, которые учитываются при проектировании системы защитной оболочки для наземных атомных станций, были рассмотрены вероятные внешние воздействия на подземные станции, характерные для диверсий, террористических актов и локальных военных конфликтов. В частности, были изучены внешние воздействия заглубляющихся в скальный грунт боеприпасов, которые представляют наибольшую опасность для подземной атомной станции. При этом в расчетных характеристиках воздействий учитывалось, что современные средства доставки боеприпасов обеспечивают высокоточное поражение цели, что обуславливает вероятность попадания нескольких последовательных боеприпасов в одну точку.

Результаты расчетов, выполненных на основе математических моделей, учитывающих упругопластические деформации и структурные нарушения массива, показали, что при размещении реакторной выработки на глубине 50 м и более рассмотренные экстремальные динамические воздействия не приводят к существенным нарушениям устойчивости подземного сооружения.

Наибольшее влияние на устойчивость выработки и деформируемость вмещающего массива, наряду с нагрузками от управляемых боеприпасов, оказывают землетрясения. В настоящее время в мировой практике накоплен достаточно большой опыт проектирования

и строительства наземных атомных станций в сейсмически активных районах. Анализ этого опыта позволяет сделать вывод о том, что в целом проблема обеспечения сейсмостойкости таких объектов решается успешно при соответствующем выборе района размещения атомного энергоисточника. Что касается подземных атомных станций, то результаты исследований в области создания таких объектов показывают, что по сравнению с наземными станциями задача обеспечения сейсмостойкости имеет ряд особенностей. Так, например, установлено, что напряженное состояние подземного сооружения при сейсмических воздействиях определяется не только инерционными нагрузками от масс сооружений, но и сейсмонапряженным состоянием вмещающего грунтового массива вследствие распространения в нем волн напряжений (так называемое «неинерционное давление»), причем устойчивость подземных сооружений определяется последними. При этом могут иметь место эффекты дифракции и интерференции сейсмических волн, обусловленные близким расположением подземных сооружений к дневной поверхности или границе раздела грунтовых слоев с различными физическими свойствами.

Практически во всех исследованиях, проведенных в ряде стран (США, Канада, Япония), указывается на снижение интенсивности сейсмических воздействий на сооружения подземной атомной станции по сравнению с наземным расположением. Аналогичные в качественном отношении выводы были получены и по результатам исследований Горного института КНЦ РАН для конкретных горно-геологических условий возможной площадки размещения подземной станции на Кольском п-ове.

Результаты исследований различных авторских коллективов позволили установить, что для подземной атомной станции опасность представляет не столько интенсивность землетрясения на дневной поверхности, сколько наличие, состояние и поведение активных разломов в зоне размещения подземных сооружений. Подтверждением этого являются отчеты о некоторых землетрясениях, свидетельствующие о наличии разрушений только в тех случаях, когда подземные объекты попадают на разломы. Из этих соображений можно сделать вывод о том, что целесообразно не ограничивать расчетную интенсивность землетрясений, а ужесточить требования к выбору площадок для подземных объектов, не допуская размещения подземных выработок в зоне активных разломов и трещин. Ограничения в расчетной интенсивности землетрясений могут быть рекомендованы для коммуникационно-входного комплекса в связи с возможной неустойчивостью склонов при сейсмическом воздействии.

Наряду с изучением внешних динамических воздействий, в исследованиях Горного института КНЦ РАН была выполнена оценка безопасности подземных атомных станций при эксплуатации, проектных и запроектных гипотетических авариях. Результаты этих исследований позволили сделать вывод о том, что подземные комплексы и скальные массивы могут использоваться в качестве эффективных аккумуляторов тепла и радиоактивных выбросов при локализации крупных аварий, в том числе связанных с плавлением ядерного топлива. Небольшие поперечные сечения, связывающие реакторную выработку с атмосферой (шахты, подходные выработки, коммуникационные каналы и т. п.), и современные быстродействующие конструкции затворов создают благоприятные условия их полного перекрытия и организации пассивного отвода радиоактивных выбросов на конденсирующие и фильтрующие устройства в пределах подземного комплекса атомной станции.

Заключение

В экстремальных природно-климатических условиях Арктики в особой степени проявляется актуальность проблемы энергетической безопасности удаленных и труднодоступных территорий, современное состояние энергетического комплекса которых является слабым звеном производственной инфраструктуры арктических регионов и одним из основных факторов, сдерживающих развитие промышленности во многих районах и освоение потенциально привлекательных месторождений полезных ископаемых. Именно поэтому создание альтернативных источников энергии и модернизация энергетической инфраструктуры в арктических регионах страны рассматривается в качестве одной из приоритетных задач, решение которых направлено на достижение главных целей государственной политики Российской Федерации в Арктике.

Для решения проблемы энергообеспечения удаленных и труднодоступных регионов различными специалистами выполнен многофакторный анализ энергетической инфраструктуры арктических территорий, который позволил определить условия и области возможного эффективного использования АСММ в качестве источников энергии для энергообеспечения потребителей в децентрализованной зоне энергетического комплекса российской Арктики.

На сегодня в России сформирован широкий спектр современных разработок атомных энергоисточников малой мощности, которые базируются на многолетнем опыте проектирования и эксплуатации судовых реакторных установок и характеризуются свойствами внутренней самозащищенности, направленными на повышение уровня безопасности.

Подземное размещение АСММ позволяет обеспечить гарантированный уровень их безопасности и повысить эффективность их использования за счет размещения вблизи от потребителей энергетической продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Освоение минерально-сырьевых ресурсов Севера: варианты энергоснабжения / *И. Ю. Иванова [и др.]* // Регион: экономика и социология. 2011. № 4. С. 187–199.
2. *Смоленцев Д. О.* Развитие энергетики Арктики: проблемы и возможности малой генерации // Арктика: экология и экономика. 2012. № 3 (7). С. 22–29.
3. *Старостина Л. В., Куушкина В. Р.* Индикативный анализ топливно- и энергообеспеченности Республики Саха (Якутия). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/39tvn113.pdf> (дата обращения: 17.05.2015).
4. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года: утв. Президентом РФ 8 февр. 2013 г. № Пр-232. URL: <http://government.ru/news/432/> (дата обращения: 15.01.2015).
5. *Иванова И. Ю., Туузозова Т. Ф., Ижбулдин А. К.* Приоритеты развития локальной энергетики Арктической зоны на востоке РФ. URL: [http://sei.irk.ru/energy21/papers/Иванова % 20ИЮ % 20 и % 20 др % 20 % 20 Приоритеты % 20развития % 20локальн ой%20энергетики %20 арктической%20зоны.pdf](http://sei.irk.ru/energy21/papers/Иванова%20ИЮ%20и%20др%20Приоритеты%20развития%20локальной%20энергетики%20арктической%20зоны.pdf) (дата обращения: 30.11.2015).
6. *Санеев Б. Г.* Роль атомных станций малой мощности в зонах децентрализованного энергоснабжения на Востоке России // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. М.: Наука, 2011. С. 88–100.
7. В развитии арктической энергетики заказчики делают ставку на атомные станции малой мощности. URL: <http://www.innov-rosatom.ru/news/181/> (дата обращения: 12.10.2015).
8. *Петров Н. А., Санеев Б. Г., Сафронов А. Ф.* Основные положения Энергетической стратегии Республики Саха (Якутия) до 2030 года. URL: www.sei.irk.ru/symp2010/papers.html (дата обращения: 16.06.2016).
9. Об утверждении Схемы территориального планирования Архангельской области: постановление Правительства Архангельской обл. от 22 дек. 2012 г. № 608-пп. URL: <http://docs.cntd.ru/document/462601002> (дата обращения: 15.03.2016).
10. *Адамов Е. О.* Состояние разработок АСММ в мире и России, приоритеты и перспективы их создания. URL: [http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/5e334977fec5bf72d7 dedcb904a914c0.pdf](http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/5e334977fec5bf72d7dedcb904a914c0.pdf) (дата обращения: 06.10.2015).
11. *Кузнецов В. В.* Обзор существующих и перспективных атомных станций малой мощности в Российской Федерации и за рубежом // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / *Субки М. Хадид [и др.]*; под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. М.: Наука, 2011. С. 159–178.
12. Проектные и технологические разработки для реакторов малой и средней мощности — перспективы и проблемы внедрения // Атомные станции малой

мощности: новое направление развития энергетики / под ред. А. А. Саркисова. М.: Академ-Принт, 2015. Т. 2. С. 14–35. **13.** Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. НП-031-01. URL: <http://www.bestpravo.ru/rossijskoje/vr-pravo/z2w.htm> (дата обращения 26.02.2013). **14.** Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСП-97. URL: http://seismos-u.ifz.ru/ocp-97_abc_big.htm (дата обращения 19.02.2013). **15.** ОСП-97-D. URL: <http://seismos-u.ifz.ru/ocp-97d.htm> (дата обращения 24.07.2013). **16.** Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации: пояснительная записка к комплекту карт ОСП-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах. URL: http://seismos-u.ifz.ru/documents/_zapiska_OCP_2016.pdf (дата обращения: 11.11.2016). **17.** Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики: материалы междунар. конф.: в 3 ч. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. Ч. 1. 85 с. **18.** Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики: материалы междунар. конф.: в 3 ч. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. Ч. 2. 274 с. **19.** Мельников Н. Н., Конухин В. П., Наумов В. А. Подземные атомные станции. Апатиты: КНЦ РАН, 1991. 138 с.

Сведения об авторах

Мельников Николай Николаевич — доктор технических наук, профессор, академик РАН, научный руководитель Горного института КНЦ РАН

E-mail: root@goi.kolasc.net.ru

Гусак Сергей Андреевич — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией Горного института КНЦ РАН

E-mail: gusnat52@mail.ru

Наумов Вадим Алексеевич — кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: naumovva@goi.kolasc.net.ru

Author Affiliation

Nikolay N. Melnikov — Dr. Sci. (Engineering), Professor, Academician of the RAS, Research Manager of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: root@goi.kolasc.net.ru

Sergey A. Gusak — Ph D (Engineering), Associate Professor, Head of Laboratory of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: gusnat52@mail.ru

Vadim A. Naumov — Ph D (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: naumovva@goi.kolasc.net.ru

Библиографическое описание статьи

Мельников, Н. Н. Использование атомных станций малой мощности для энергоснабжения арктических месторождений твердых полезных ископаемых / *Н. Н. Мельников, С. А. Гусак, В. А. Наумов* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 1. — С. 66–77.

Reference

Melnikov Nikolay N., Gusak Sergey A., Naumov Vadim A. Use of Small Nuclear Power Plants for Power Supply of the Arctic Solid Mineral Deposits. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1 (9), pp. 66–77. (In Russ.).

УДК 622.02

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОМОНИТОРИНГА УСТОЙЧИВОСТИ СКАЛЬНЫХ ОТКОСОВ

Н. Н. Абрамов, Ю. А. Епимахов, Е. В. Кабеев
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

Аннотация

Для разработки эффективных и оптимальных способов обеспечения устойчивости скальных откосов использован геомеханический мониторинг их состояния натурными методами. Инструментальная оценка состояния массива пород выполняется с использованием методов сейсмической пространственно-временной томографии (СПВТ) и методов контроля смещений и деформаций. Приведены результаты геомониторинга откосов отводящего канала Кумской ГЭС на Кольском п-ове. На основании полученных данных существенно скорректированы рекомендации по укреплению откосов.

Ключевые слова:

геомеханическое состояние массива, геомониторинг, сейсмотомография, скорость волны, физико-механические свойства массива.

METHODICAL PROVISION OF GEO-MONITORING FOR HARD ROCK SLOPE STABILITY

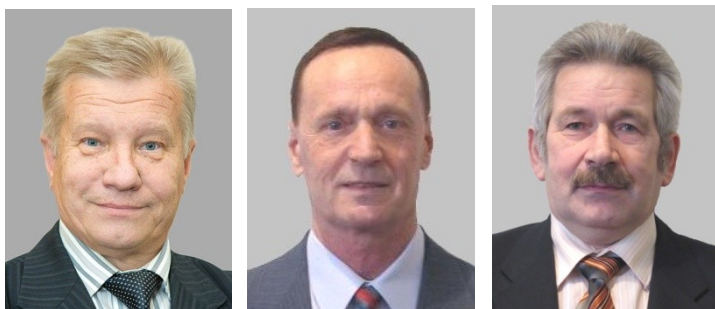
Nikolay N. Abramov, Jury A. Epimakhov, Eugene V. Kabeev
Mining Institute of the KSC of the RAS

Abstract

Geomechanical *in situ* monitoring has been used to develop efficient and rational methods, aimed at providing hard rock slope stability. The rock mass state was estimated with methods of seismic spatial-temporal tomography and control for displacements and deformations. The paper gives results of geomonitoring for slopes of the outlet canal, the Kumskaya HPP, the Kola Peninsula. The guidelines on slopes strengthening have been significantly refined on the basis of the data obtained.

Keywords:

geomechanical state of rock mass, geo-monitoring, seismic tomography, wave velocity, physical-mechanical properties of rock mass.



С проблемой обеспечения устойчивости скальных откосов (уступов) сталкиваются при их формировании в процессе ведения открытых горных работ на карьерах, при формировании береговых откосов каналов в гидротехническом и дорожном строительстве, включая многие другие

виды работ, и на многочисленных объектах. Так, например, водоотводящие каналы гидроэлектростанций являются одним из важнейших элементов сложной гидротехнической

системы, обеспечивающим ее эффективную и безопасную эксплуатацию. Устойчивость откосов, образованных в прочных скальных породах с использованием буровзрывных способов проходки, определяется в основном степенью нарушенности приконтурного массива, его природной структурой. На сегодняшний день уже ясно, что высокая эффективность мер поддержания откосов в устойчивом состоянии и подбор оптимального крепления могут быть достигнуты на основе комплексного использования информации об инженерно-геологических характеристиках вмещающего массива, дополненных данными о фактическом геомеханическом состоянии откосов, которые получены путем применения современных методов натурного геомониторинга. Методология геомониторинга должна основываться на первичной экспертной оценке состояния откосов канала с использованием балльного анализа оценки опасности [1], на результатах визуального осмотра, на использовании методик инструментальных наблюдений для оценки геомеханических характеристик пород, нарушенности массива, качества межблоковых контактов, с выделением различных по состоянию участков массива, а также методик геодезических и высокоточных деформационных наблюдений для оценки подвижек блоков на потенциально опасных участках откосов отводящего канала. Блок-схема предложенной методологии (рис. 1) реализована при укреплении опасных по устойчивости участков береговых скальных откосов отводящего канала Кумской ГЭС (ГЭС-9 каскад Нивских ГЭС, Карелия).



Рис. 1. Методология геомониторинга состояния скальных откосов

Отводящий канал Кумской ГЭС-9, пройденный в породах крепких биотитовых гнейсов и микроклиновых гранитов, имеет береговые откосы с углами наклона $70\text{--}75^\circ$, высоту от уреза воды до верхней бровки $10\text{--}12$ м. Трещины основной системы, имеющие простирание З-СЗ, секут откосы канала под острыми углами (до 25°) или располагаются параллельно откосам. Со стороны правого берега они наклонены в сторону канала, что создает опасность вывалов отдельных блоков породы. У здания ГЭС находится один из самых неблагоприятных участков массива по структурным особенностям — узел пересечения систем трещин. Необходимость укрепления откосов возникла после произошедшего обрушения породы на участке откоса правого берега объемом около $50\text{--}60$ м³. Обрушение, как было установлено, произошло по плоскости скольжения трещины, ослабленной воздействием техногенных и естественных водопритоков (рис. 2).



Рис. 2. Правый берег канала с зоной вывала $50\text{--}60$ м³

Выполненная экспертная оценка состояния бортов канала по инженерно-геологическим особенностям массива и на основе использования балльной системы оценки опасности [1], учитывающая морфологические особенности откосов, инженерно-геологические характеристики трещиноватости, физико-механические свойства пород, статистику обвальных явлений и проч., позволила отнести борта канала ко II классу потенциальной опасности и классифицировать их как «опасные». Данный класс предусматривает выполнение мероприятий по профилактике и укреплению отдельных участков откосов берегов канала.

Разработанный проект крепления предусматривал использование анкерного крепления с длиной анкеров 15–20 м. Однако накопленный опыт и современная практика ведения работ, особенно на горных предприятиях, показывают, что назначение тех или иных способов крепления откосов должно основываться на фактических результатах натурного мониторинга состояния вмещающего массива.

Оценка фактического состояния массива и состояния трещинных контактов на участке обрушения выполнена по методике сейсмической пространственно-временной томографии [2, 3] и контролируется на основе результатов долгосрочных геодинамических наблюдений подвижек отдельных блоков массива. На откосе канала выполнено сейсмическое просвечивание массива с размещением сейсмоприемников вдоль уреза воды (рис. 3, а). Точки возбуждения сейсмической волны находились на вершине откоса вдоль его верхней бровки, в 5 м от края откоса (рис. 3, б). Сейсмоизмерения производились 24-канальной цифровой сейсмостанцией Elliss.



Рис. 3. Схема сеймопросвечивания откоса: а — установка датчиков; б — сечение откоса

Набор сейсмических данных и их обработка осуществляются с использованием сейсмотомографического пакета программ «Х-Томо». Шаг расстановки сейсмоприемников составил 4 м, шаг точек возбуждения сейсмических волн на профиле — 4 м, частота приемного канала сейсмостанции — до 768 Гц. Способ возбуждения сейсмической волны — ударный, способ крепления сейсмоприемников к стенке выработки — на резьбовой анкер. Длина профиля — 50 м.

Методика проведения сейсмотомографических наблюдений при оценке состояния скального массива уже довольно широко опубликована авторами в различных изданиях, в том числе и на страницах данного журнала [2, 3], поэтому в статье приведем только основные методические положения. Методика осуществляется на основе анализа первых вступлений времен пробега, собранных для совокупности пар «источник — приемник» [4, 5]. Расчет геофизических показателей нарушенности массива с определением категорий нарушенности выполняется на основе замера скоростей прохождения продольных и поперечных сейсмических волн V_p и V_s по разработанным геофизическим показателям B_e и K [1, 5–7], определяемым как:

$$B_e = \left(V_{p0} / V_{pi} \right)^2 - 1 \quad (1)$$

$$\mu_i = \frac{\left(1 - 2 \left(\frac{V_s^2}{V_p^2}\right)\right)}{2 \left(1 - \left(\frac{V_s^2}{V_p^2}\right)\right)} \quad (2)$$

$$K = \mu_i / \mu_0 = f\left(\left(V_s / V_p\right)^2\right), \quad (3)$$

где V_{p0} , V_{pi} — скорость продольных волн в монолитном и реальном трещиноватом массиве соответственно; μ_i , μ_0 — коэффициент Пуассона для нарушенного и сохранным массивов соответственно; V_s — скорость поперечной волны.

Величины V_{p0} и μ_0 определены по результатам измерений скоростей продольных и поперечных волн в лабораторных условиях для представительной выборки отобранных образцов гранитогнейсов и приняты: $V_{p0} = 5,67$ км/с, $\mu_0 = 0,27$.

В физическом отношении, если показатель B_e характеризует снижение скоростей продольных волн в нарушенных участках массива при его просвечивании, показатель K показывает вариации коэффициента Пуассона μ_i , вызванные изменением состояния (например, намоканием) вмещающих трещинные контакты заполнителя по сравнению с величиной μ_0 . Томограмма скоростей продольных волн и распределение соотношения V_s/V_p в плоскости просвечивания А–А представлены на рис. 4, а.

Выполненное на основе натуральных измерений категорирование массива пород по степени нарушенности по показателю B_e (использовалась 5-категорийная шкала [1, 7]: от категории I — чрезвычайно нарушенные породы до категории V — сохранные породы) позволило выделить три зоны полученного разреза (рис. 4, б). Зона 1 и зона 3 (светло-коричневая палитра): породы категории II–III — сильно- и средненарушенные (приурочены к обнажениям откоса); зона 2 включает категории IV, V — слабонарушенные и сохранные породы (срединная часть разреза). Если сопоставить полученные результаты с геометрией эксперимента (рис. 3, б), то можно легко определить, что мощность зоны нарушенных пород приурочена к обнажению откоса и не превышает 1,5–2,0 м от его контура. Состояние трещинного контакта по наиболее опасному нарушению с простираем под острым углом к оси канала можно оценить по томограммам (рис. 4).

Для продольных p -волн это нарушение практически прозрачно и незаметно. Оно не проявилось на томограмме скорости V_p , и участок нарушения категоризируется по B_e как область слабо- и средненарушенных пород, не представляющий опасности — категорий III–IV. Однако на томограмме V_s/V_p , благодаря большей чувствительности поперечных s -колебаний, это нарушение зафиксировано зоной повышенных значений коэффициента Пуассона ($\mu = 0,33$ – $0,43$). Наиболее опасными для устойчивости откоса в выделенной зоне являются области с величинами $\mu = 0,38$ – $0,43$, характерные для участков намокания и водонасыщения (зона D (голубая палитра) на рис. 4, б). Однако доля подобных участков, как видно из томограммы, незначительна, и она не должна оказывать существенного влияния на устойчивость обнажений откоса. Для формирования достоверных представлений об устойчивости массива на откосах организованы деформационные наблюдения за мелко- и среднеблоковыми смещениями на малых базах высокоточными струнными дистометрами JSETH (Швейцария) и долгосрочный геодинамический контроль смещений по геодезическим маркам на крупных структурных нарушениях.

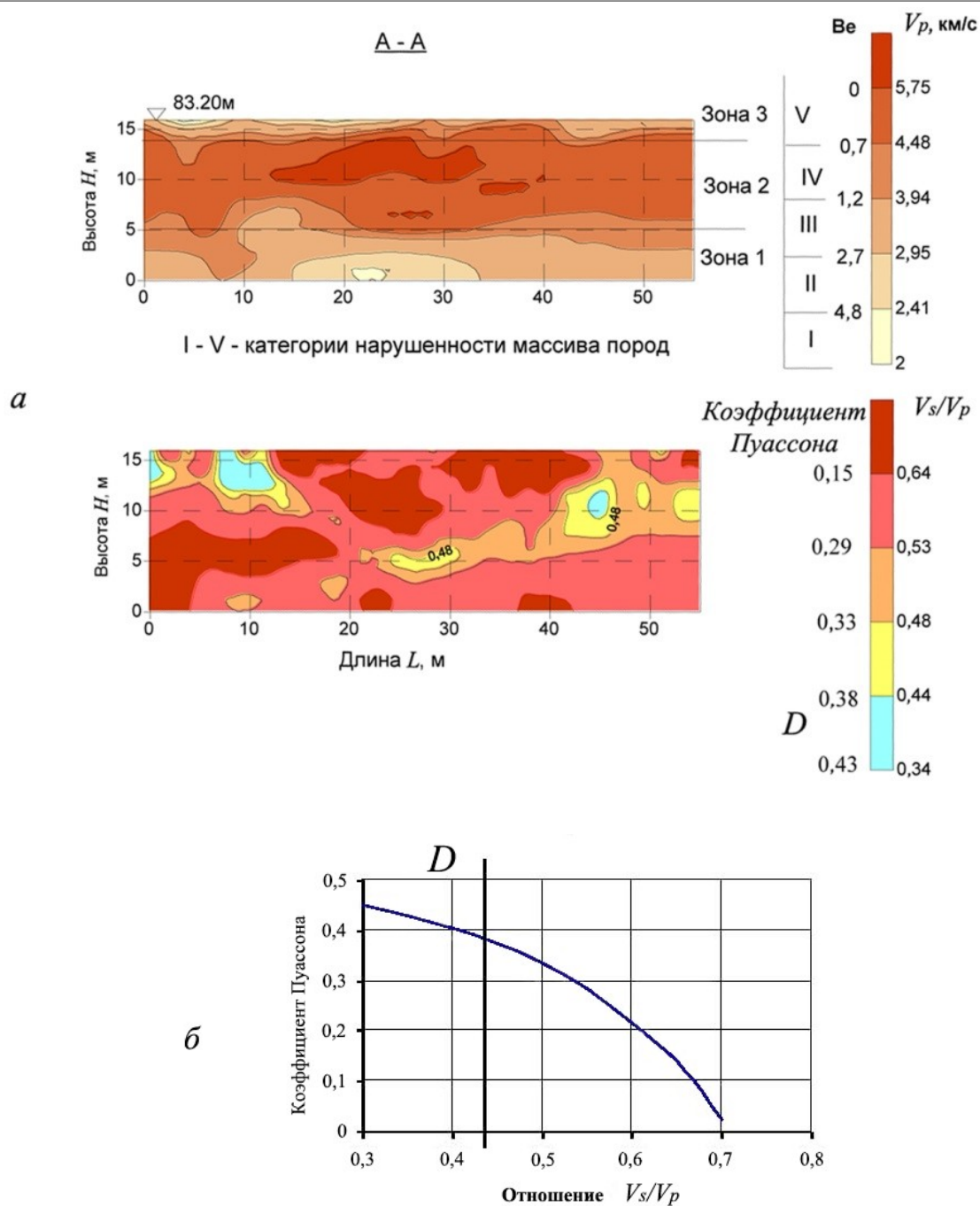


Рис. 4. Результаты натурного сейсмомониторинга откоса:

a — томограмма распределения скоростей продольных волн V_p и распределение соотношения V_s/V_p в плоскости эксперимента; *b* — взаимосвязь $\mu = f(V_s/V_p)$. *D* — область, характерная для сильнонарушенных, обводненных пород

Полученные в результате геомониторинга данные о мощности нарушенной зоны приконтурного массива береговых откосов канала и состоянии трещинных контактов явились исходными данными для расчета параметров установленной крепи и позволили оптимизировать параметры анкерного крепления, значительно сократив длину анкеров и разрядив шаг их установки. Геодинамический мониторинг смещений, регулярно выполняемый геодезической

службой контроля ОАО «ТГК-1», по установленным геодезическим маркам зафиксировал значительное снижение динамики смещений блоков по правому берегу канала после установки крепления, что свидетельствует о его эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по проектированию противооползневых и противообвальных защитных сооружений. М.: Минтрансстрой, 1983. С. 119. 2. *Абрамов Н. Н., Епимахов Ю. А.* Геофизический мониторинг при строительстве и эксплуатации объектов горно-промышленного комплекса и гидроэнергетики. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. 177 с. 3. *Абрамов Н. Н., Епимахов Ю. А.* Инструментальная оценка влияния природно-техногенных факторов на геомеханическое состояние массива, вмещающего подземный машинный зал ГЭС // Гидротехническое строительство. 2015. № 11. С. 59–62. 4. Яновская Т. Б. Проблемы сейсмической томографии: сб. науч. тр. // Проблемы геотомографии. М.: Наука, 1997. С. 86–97. 5. *Никитин В. Н.* Основы инженерной сейсмологии. М.: Изд-во МГУ, 1981. 176 с. 6. Савич А. И., Яценко З. Г. Исследования упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. М.: Недра, 1979. 213 с. 7. *Мосинец В. М., Абрамов А. В.* Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. М.: Недра, 1982. 248 с.

Сведения об авторах

Абрамов Николай Николаевич — кандидат технических наук, зав. лабораторией Горного института КНЦ РАН

E-mail: abramov@goi.kolasc.net.ru

Епимахов Юрий Александрович — доктор технических наук, консультант Горного института КНЦ РАН

E-mail: root@goi.kolasc.net.ru

Кабеев Евгений Владимирович — ведущий технолог Горного института КНЦ РАН

E-mail: root@goi.kolasc.net.ru

Author Affiliation

Nikolay N. Abramov — PhD (Engineering), Head of Laboratory of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: abramov@goi.kolasc.net.ru

Jury A. Epimakhov — Dr. Sci. (Engineering), Adviser of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: root@goi.kolasc.net.ru

Eugene V. Kabeev — Leading Engineer of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: root@goi.kolasc.net.ru

Библиографическое описание статьи

Абрамов, Н. Н. Методическое обеспечение геомониторинга устойчивости скальных откосов / *Н. Н. Абрамов, Ю. А. Епимахов, Е. В. Кабеев* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 1 (9). — С. 78–84.

Reference

Abramov Nikolay N., Epimakhov Jury A., Kabeev Eugene V. Methodical Provision of Geo-Monitoring for Hard Rock Slope Stability. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1 (9), pp. 78–84 (In Russ.).

УДК 622.838.5

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ЧАСТИЧНОЙ ВЫЕМКИ ЦЕЛИКОВ НА РУДНИКЕ «КАРНАСУРТ»*

А. В. Ловчиков, С. Н. Савченко
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

Аннотация

Ловозерское редкометалльное месторождение обрабатывается рудником «Карнасурт» на двух маломощных (мощность 1 м) пологопадающих (10–15° к горизонту) рудных залежах системой разработки с поддержанием подработанных покрывающих толщ пород постоянными рудными ленточными целиками. В текущий период при глубине очистных работ до 500–600 м от поверхности потери руды составляют свыше 25 %, а с углублением работ потери руды в целиках должны значительно возрасти. В статье рассматривается возможность частичного извлечения руды из целиков на отработанных площадях залежей с целью уменьшения потерь руды.

Ключевые слова:

целики, покрывающие породы, потери руды, численное моделирование, распределение напряжений, несущая способность целиков.

ESTIMATION OF POSSIBLE PARTIAL EXCAVATION OF PILLARS ON THE KARNASURT MINE

Alexander V. Lovchikov, Stepan N. Savchenko
Mining Institute of the KSC of the RAS

Abstract

The Lovozero rare-metal deposit is mined by the Karnasurt underground mine in two thin (1 m thickness) flat-dipping (10–15° to the horizon) ore bodies. The deposit is developed by a mining system with supporting undermined cap rocks by permanent ore rib pillars. Currently on a depth of stoping operations equal to 500–600 m the ore loss is higher than 25 %, deepening of mining will result in considerable increase of losses. The paper considers possibility of particular extraction of ore from pillars at mined ore bodies for the purpose to reduce ore loss in pillars.

Keywords:

pillars, cap rocks, ore loss, numerical modelling, distribution of stresses, carrying capacity of pillars.



Ловозерское редкометалльное месторождение, разведанное на двенадцати участках, в текущий момент разрабатывается только на двух участках — «Карнасурт» и «Кедыквырпахк» рудником «Карнасурт», остальные находятся в резерве. Данный рудник обрабатывает две пологопадающие (10–15 к горизонту) пластообразные рудные залежи, выходящие на поверхность, выемочная мощность

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-05-04323а.

каждой из которых составляет 1 м, расстояние между залежами по вертикали — 90–110 м. Отработка залежей ведется панелями по простиранию. Ширина панелей ранее составляла 30–70 м, в последние годы она увеличилась до 200–250 м. Ввиду гористого рельефа поверхности глубина горных работ составляет от 30–50 м вблизи выходов залежей на поверхность до 500–600 м на глубоких горизонтах.

Отработка залежей ведется сплошной системой разработки с поддержанием покрывающих пород постоянными опорными ленточными целиками. Размеры целиков рассчитываются на поддержание полного веса толщи покрывающих пород до поверхности. Поскольку отработанные очистные блоки не закладываются и не обрушаются, площадь выработанного пространства непрерывно возрастает. Рудник ежегодно отрабатывает 100–150 тыс. м² залежей, таким образом, площадь выработанного пространства ежегодно прирастает на эту величину. В настоящее время потери руды в целиках составляют свыше 25 %, с увеличением глубины раработки величина потерь руды в целиках еще более возрастет.

Очистные панели по падению рудных залежей ограничиваются штреками, которые проходятся по простиранию залежей через 20–40 м по вертикали. Длина панелей по простиранию залежей достигает 6–7 км. Очистные панели по простиранию через 80–120 м разделяются на очистные блоки. Таким образом, очистные блоки высотой 1 м имеют размеры от 30–70 до 200–250 м по падению рудных залежей и 80–120 м по простиранию. По периметру очистные блоки ограничиваются околострековыми и междублоковыми ленточными целиками, ширина которых рассчитывается в соответствии с весом толщи налегающих пород. Для обеспечения устойчивости кровли внутри очистных блоков оставляются внутриблоковые целики (размером 1–2 на 3–4 м) по сетке 6–15 м друг от друга, которые, для придания искусственной податливости, камуфлируются, чтобы избежать опасности горных ударов. При расчете нагрузок на целики площадь внутриблоковых целиков не учитывается ввиду их искусственной податливости.

Штреки сводчатого поперечного сечения имеют площадь 3.0×2.7 м². Сверху и снизу по падению залежей штреки поддерживаются ленточными над- и подштрековыми целиками шириной не менее 3 м. После отработки очистных блоков и панелей они в дальнейшем не обрушаются, не закладываются и не используются, а отделяются от действующих выработок изолирующими перемычками в подходных выработках. Схема отработки залежей на руднике «Карнасурт» представлена поперечным вертикальным сечением шахтного поля рудника вкрест простирания рудных залежей, целики не показаны из-за мелкого масштаба изображения (рис. 1).

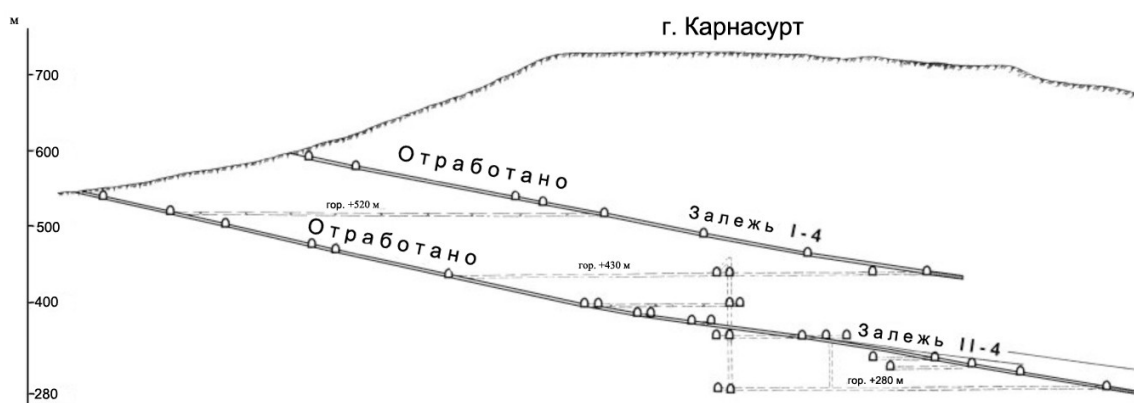


Рис. 1. Схематический вертикальный поперечный разрез рудника «Карнасурт»

Ввиду значительных потерь руды в целиках и ростом глубин разработки, весьма актуальной становится проблема снижения потерь руды. Она, в определенной степени, может быть решена за счет частичной выемки целиков на отработанных участках рудных залежей. К текущему моменту заканчивается отработка верхней залежи I-4 выше гор. +430 м (рис. 1), поэтому рассмотрена возможность выемки надштрековых целиков на отработанной части этой залежи. Задача решалась методами численного моделирования (с использованием метода граничных элементов) в двухмерной постановке первой задачи теории упругости. Поскольку напряженное состояние околоштрековых целиков во всех соседних панелях залежи I-4 идентично, рассмотрено напряженное состояние таких целиков для одного горизонта, расположенного на глубине 200 м от поверхности. Схема моделируемого участка вертикального разреза рудника приведена на рис. 2.

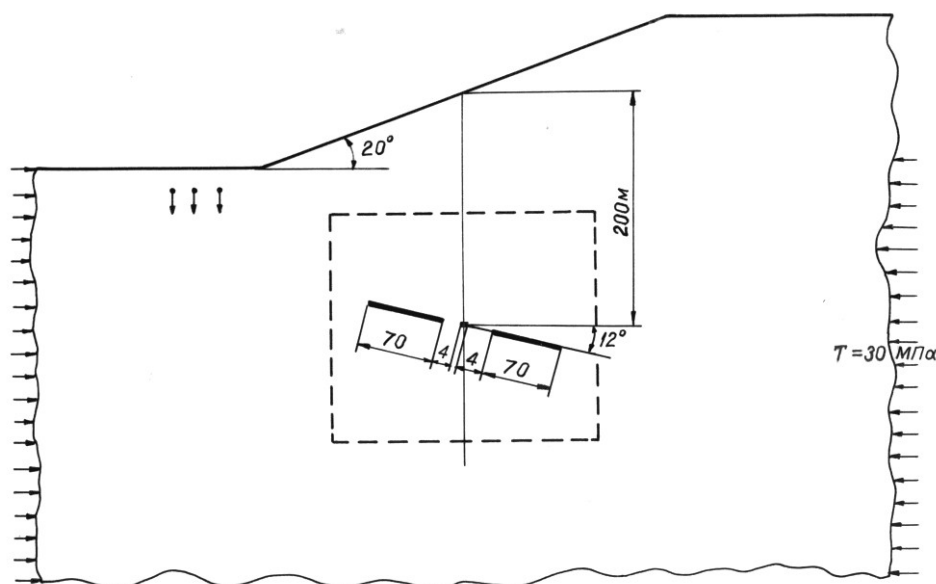


Рис. 2. Схема модели, имитирующей напряженное состояние околоштрековых целиков на залежи I-4

Поясним геометрическую схему модели и граничные условия. Рельеф дневной поверхности в модели (рис. 2) принят в соответствии со средней геометрией склона г. Карнасурт. Наклон очистных выработок (12°) и их длина (70 м) выбраны близкими к размерам выработок на отработанной части залежи I-4. Размеры околоштрековых целиков (над- и подштрекового) приняты одинаковыми и имеют ширину 4 м. Размеры сечения штрека приняты $3 \times 3 \text{ м}^2$ (квадратной формы) для упрощения расчетов, высота очистных выработок — 2 м. В качестве граничных условий принято действие гравитационных сил $\sigma_y = \gamma H$; $\sigma_x = \lambda \gamma H$ и горизонтальных сжимающих тектонических сил $T_x = -30 \text{ МПа}$ (здесь γ — удельный вес пород, т/м^3 ; $\lambda = \frac{\nu}{1-\nu}$ — коэффициент бокового распора ($-\nu$ — коэффициент Пуассона, $\nu = 0,25$). Численные значения гравитационных и тектонических напряжений получены из решения задачи предыдущего этапа исследований [1]. Расчет напряжений с шагом $5 \times 5 \text{ м}^2$ выполнен в области $200 \times 200 \text{ м}^2$, ограниченной пунктирной линией (рис. 2). В области $60 \times 60 \text{ м}^2$ выполнен расчет с шагом $1 \times 1 \text{ м}^2$.

Для более точного определения характера расположения и величин напряжений в целиках построены картины изолиний в области целиков $20 \times 20 \text{ м}^2$ с шагом $1 \times 1 \text{ м}^2$. Исследования выполнены в двух вариантах:

- а) между очистными выработками и штреком имеются два целика (над- и подштрековый);
- б) надштрековый целик отработан.

Картины распределения напряжений в целиках показаны на рис. 3. Из рис. 3, а, видно, что напряжения σ_x изменяются от 0 (на вертикальных стенках выработок) до -57 МПа в кровле и почве штрека. В целиках напряжения σ_x находятся в пределах $0-25 \text{ МПа}$. Картина распределения вертикальных напряжений σ_y в целиках показана на рис. 3, б, из которого видно, что в целиках наибольшие значения σ_y находятся в пределах $-(50-60) \text{ МПа}$. Наиболее точные значения σ_y (их числовых распечаток) следующие: $-72,7 \text{ МПа}$ в левой стенке надштрекового целика, $58,6 \text{ МПа}$ в правой стенке подштрекового целика.

Если сравнить эти напряжения с величиной $\sigma_y = \gamma H$ (при $H=200 \text{ м}$), то получим 10-кратную концентрацию напряжений от действия собственного веса пород. Распределение напряжений в окрестности штрека в случае отработки надштрекового целика показано на рис. 4, а и б.

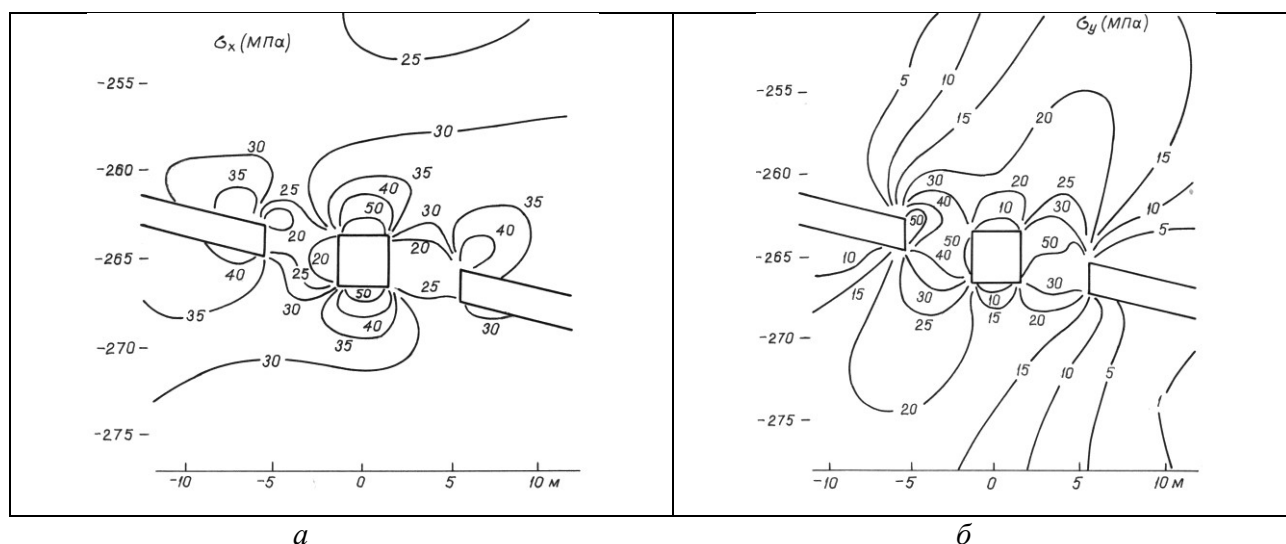


Рис. 3. Распределение горизонтальных σ_x (а) и вертикальных σ_y (б) напряжений в околоштрековых целиках

Характер распределения горизонтальных напряжений вокруг штрека при удалении надштрекового целика показан на рис. 4, а. Горизонтальные напряжения в целике значительно увеличились — до -40 (в целике) и до -90 МПа (в кровле и почве штрека). Иначе говоря, в кровле и почве штрека концентрация горизонтальных напряжений $\sigma_x = 3T_x$. Эти напряжения близки к пределу прочности пород при одноосном сжатии, что в естественных условиях может привести к разрушению пород в динамической форме. В удаленных от целиков зонах распределение вертикальных напряжений σ_y практически не изменилось. Существенные величины приобретают вертикальные напряжения σ_y в оставшемся целике (рис. 4, б). Так, максимальные значения σ_y в целике стали $-93,2$ (в правой стенке оставшегося подштрекового целика) и -92 МПа (в левой его стенке). Максимальная концентрация вертикальных напряжений $\sigma_y = 15\gamma H$.

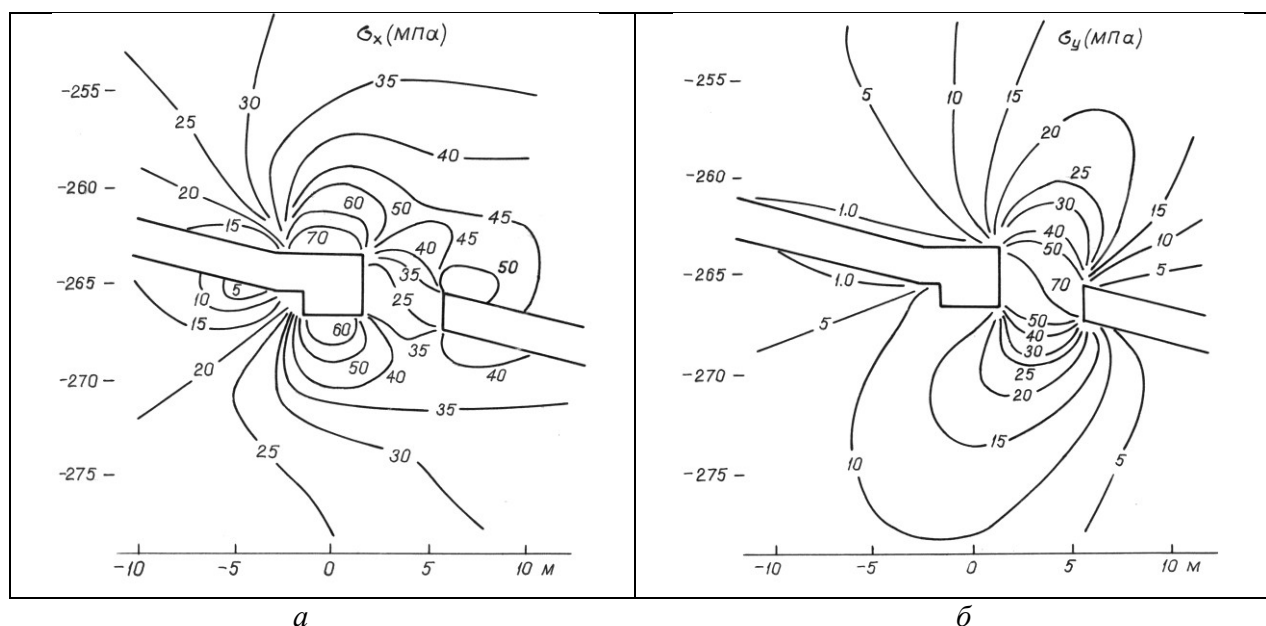


Рис. 4. Распределение горизонтальных σ_x (а) и вертикальных σ_y (б) напряжений в подштрековом целике после выемки надштрекового целика

Для оценки прочности целиков и устойчивости прилегающих к ним пород кровли выработок приведем данные о физико-механических свойствах руд и пород рудника «Карнасурт» (табл. 1) [2]. Напомним, что именно из этих пород — уртитов, фойяитов и луявритов — состоят рудосодержащие, а также вмещающие породы кровли и почвы залежи I-4. Как видно из рис. 4, б, при выемке надштрекового целика нигде не достигается предел прочности пород на сжатие (табл. 1), то есть прочность подштрекового целика при этом обеспечивается. Уровень максимальных напряжений в оставшемся подштрековом целике достигает в некоторых точках значений $0,5\sigma_{сж}$, что свидетельствует о возможности в этих точках динамических проявлений горного давления.

Таблица 1

Физико-механические свойства пород и руд рудника «Карнасурт»

Порода	Плотность, т/м ³	Предел прочности (МПа) при		Модуль упругости, $E \cdot 10^{-4}$, МПа	Коэффициент	
		сжатии	растяжении		Пуассона	хрупкости
Фойяит	2,65	160–243	5,9–8,5	5,1–6,0	0,25–0,30	25–32
Уртит	2,75	247	9,5	7,6	0,27	26
Луяврит	2,6–2,96	187–332	7,1–12	4,6–7,3	0,27–0,31	24–31
Малиньит (руда)	2,7	168	8,5	6,0	0,25	21

Подсчитаем напряжения в оставшемся подштрековом целике (без учета распределения напряжений в нем) по формуле

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\left[\left(\frac{L_1+L_2}{2}\right)+2d+b\right]H_{\text{ср}}\cdot\gamma}{d}, \quad (1)$$

где L_1 и L_2 — пролет соседних очистных выработок, м;

d — ширина над- и подштрекового целиков, м;

b — ширина штрека, м;

$H_{\text{ср}}$ — средняя глубина выработок до поверхности, м;

γ — удельная масса покрывающих пород, т/м³.

Как видно из рис. 2, $L_1=L_2=70$ м, $d=4$ м, $b=3$ м, $H_{\text{ср}}=200$ м, $\gamma=2,73$ т/м³, тогда $\sigma_{\text{ср}}=11\,060$ т/м², что составляет около $0,7\sigma_{\text{сж}}$ и соответствует уровню вертикальных напряжений, полученному из результатов численного моделирования (рис. 4, б).

Уровень напряжений в целике, составляющий $0,7\sigma_{\text{сж}}$, является высоким, что свидетельствует об опасности горных ударов в нем [3], однако при оценке несущей способности и удароопасности пород в рассматриваемых целиках необходимо иметь в виду два следующих обстоятельства.

Во-первых, в действительности уровень напряжений в оставшихся подштрековых целиках должен быть значительно ниже рассчитанного и полученного в результате моделирования (рис. 4, б), так как при решении задачи (рассматривалась плоская задача) в расчет не принимались междублоковые целики, на долю которых приходится до 50 % нагрузок от веса пород, которые налегают над очистным блоком и которые не извлекаются;

Во-вторых, рассматриваемые целики относятся к категории низких, поскольку их высота h составляет 1 м, а ширина d больше 1 м, то есть таких целиков, у которых ширина больше их высоты; соотношение ширины и высоты целиков всегда больше единицы. Поскольку средняя часть целиков работает в условиях объемного сжатия, такие целики обладают повышенной несущей способностью. Повышение несущей способности целиков при их расчете учитывается коэффициентом формы $k_{\text{ф}}$, который вычисляется по формуле Е. Церна [4]:

$$k_{\text{ф}} = \sqrt{\frac{d}{h}}. \quad (2)$$

Удельная несущая способность некоторых целиков рудника «Карнасурт», вычисленная с учетом коэффициента Церна и минимальной прочности пород при сжатии $\sigma_{\text{сж}}=160$ МПа (табл. 1), приведена в табл. 2. Как видно из табл. 2, относительная нагрузка пород в оставшихся подштрековых целиках с учетом их повышенной несущей способности обеспечивает прочность целиков с достаточным запасом.

Таблица 2

Удельная несущая способность целиков

Ширина целика, м	3	4	5	6
Коэффициент формы	1,73	2,0	2,24	2,45
Удельная несущая способность, т/м ²	27680	32000	35840	38200
Относительная нагрузка пород в целике	0,58	0,5	0,45	0,42

В рассмотренной задаче предусмотрена возможность выемки надштрековых целиков. Во-первых, подштрековые целики значительно более равномерно нагружены, чем надштрековые [5], поэтому в них несущая способность пород более рационально используется. Во-вторых, выемка надштрековых целиков более технологична, то есть более легко осуществима, чем выемка других целиков, вследствие чего и рекомендуется к первоочередному применению. Задача решена применительно к условиям доработки вышележащей залежи I-4 рудника «Карнасурт» для глубины не более 300 м от поверхности, для других глубин разработки и других условий необходимо решать специальную задачу.

Технология выемки надштрековых целиков должна быть выработана в процессе опытно-промышленных работ. Поскольку в оставляемых подштрековых целиках в некоторых участках создается высокий уровень напряжений $\sigma_d \geq 0,5\sigma_{сж}$, в них возможны динамические проявления горного давления. Поэтому основным требованием безопасности при выемке надштрековых целиков является их отработка обратным ходом — от флангов к центру. При этом операции по уборке и транспортировке руды из взорванной массы надштрековых целиков должны выполняться под защитой оставшейся части надштрековых целиков.

Выводы

Расчетами и при помощи численного моделирования обоснована возможность безопасной выемки надштрековых целиков на отработанной части залежи I-4 рудника «Карнасурт» до глубин 200–300 м от поверхности. Устойчивость подработанных толщ покрывающих пород при этом обеспечивается за счет оставшихся целиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ловчиков А. В., Савченко С. Н.* Напряженное состояние горных пород вблизи очистных выработок на руднике «Карнасурт» // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 4. С. 741–747. 2. *Ловчиков А. В., Пернацкий С. И.* Горные удары на Ловозерском редкометалльном месторождении // Геодинамическая безопасность при освоении недр и земной поверхности. Апатиты: КНЦ РАН, 2003. С. 113–130. 3. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок / *И. А. Турчанинов [и др.]*. Л.: Наука, 1978. 256 с. 4. *Галаев Н. З.* Управление состоянием массива горных пород при подземной разработке рудных месторождений: учебник для вузов. М.: Недра, 1990. 176 с. 5. *Ловчиков А. В.* Закономерности распределения напряжений в низких рудных целиках // Проблемы механики горных пород: материалы всесоюз. науч. конф. по механике горных пород. Новосибирск: Наука, СО АН СССР, 1971. С. 282–286.

Сведения об авторах

Ловчиков Александр Васильевич — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: vocson@goi.kolasc.net.ru

Савченко Степан Николаевич — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

Author Affiliation

Aleksandr V. Lovchikov — Dr. Sci. (Engineering), Leading Researcher of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: vocson@goi.kolasc.net.ru

Stepan N. Savchenko — Dr. Sci. (Engineering), Leading Researcher of the Mining Institute of the KSC of the RAS

Библиографическое описание статьи

Ловчиков А. В. Оценка возможности частичной выемки целиков на руднике «Карнасурт» / *А. В. Ловчиков, С. Н. Савченко* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 1 (9). — С. 85–92.

Reference

Lovchikov Aleksandr V., Savchenko Stepan N. Estimation of Possible Partial Excavation of Pillars on the Karnasurt Mine. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1 (9), pp. 85–92 (In Russ.).

УДК 621.039.577 (985)

МНОГОБАРЬЕРНАЯ СИСТЕМА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Ю. Г. Смирнов, А. О. Орлов
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

Аннотация

Рассмотрены основные принципы создания многобарьерной системы безопасности подземных атомных станций малой мощности, которые могут быть альтернативным источником электрической и тепловой энергии при освоении арктических регионов России. Это достигается использованием как естественных природных, так и создаваемых инженерных барьеров. Природно-техническая система «геологическая среда — инженерный барьер» является основополагающим элементом обеспечения безопасности подземного комплекса АСММ в сложных горно-геологических и климатических условиях арктического региона России.

Ключевые слова:

геоэкологическая безопасность, породный массив, инженерный барьер, бетон, подземное размещение, атомные станции малой мощности, российская Арктика.

MULTI-BARRIER SAFETY SYSTEM FOR CONSTRUCTION AND EXPLOITATION OF UNDERGROUND SMALL NUCLEAR POWER PLANTS UNDER THE RUSSIAN ARCTIC CONDITIONS

Yuriy G. Smirnov, Alexander O. Orlov
Mining Institute of the KSC of the RAS

Abstract

The paper considers main concepts for creation of a multi-barrier safety system for underground small nuclear power plants which can be an alternative source of electric and thermal energy during developing the Russian Arctic regions. This can be achieved by applying natural and artificial engineering barriers. The natural-engineering system “geological environment — engineering barrier” is a fundamental element to provide safety for an underground small nuclear power plant under complicated mining and geological and climatic conditions of the Russian Arctic region.

Keywords:

geoecological safety, rock mass, engineer barrier, concrete, underground location, small nuclear power plants, Russian Arctic.



Особенностью строительства и эксплуатации подземных радиационно опасных подземных объектов являются: высокий уровень ответственности сооружений; использование материалов с длительным периодом отрицательного воздействия на конструктивные элементы; высокие экологические риски; незначительный мировой и отечественный опыт в области создания подобных комплексов. Основная идея сооружения

подземных атомных станций малой мощности (АСММ) заключается в создании безопасных комплексов, способных противостоять любому внешнему и внутреннему отрицательному воздействию. Окружающий породный массив при этом используется как основной защитный барьер, а подземное строительство допустимо практически в любых горно-геологических и климатических условиях.

Автономные подземные станции с энергетическими ядерными установками при высокой степени надежности могут использоваться в качестве безопасных источников электрической и тепловой энергии для решения оборонно-стратегических и социально-экономических задач при освоении арктических регионов России.

Гарантией геоэкологической безопасности подземных АСММ на период ее строительства и эксплуатации является устойчивость геологической среды, определяемая разномасштабными факторами, основными из которых являются:

- геодинамическая стабильность массива горных пород;
- постоянство гидрогеологического режима поверхностных и грунтовых вод;
- неизменность физико-механических свойств горных пород и их устойчивость к внешним воздействиям (вибрация, фильтрация вод и т. д.).

Важным конструктивным элементом защиты от воздействия радиационно опасного объекта на внешнюю среду являются многобарьерные инженерные системы, которые должны обеспечить безопасное функционирование АСММ в течение всего времени его существования. Для обеспечения безопасной работы станции важную роль играют отработка технологии формирования первичного инженерного барьера, его радиационного, температурного и физико-механического режимов. К ключевым инженерным барьерам относятся строительные бетонные (железобетонные) конструкции, перемычки и крепь подземного комплекса.

Основные функциональные задачи инженерных барьеров:

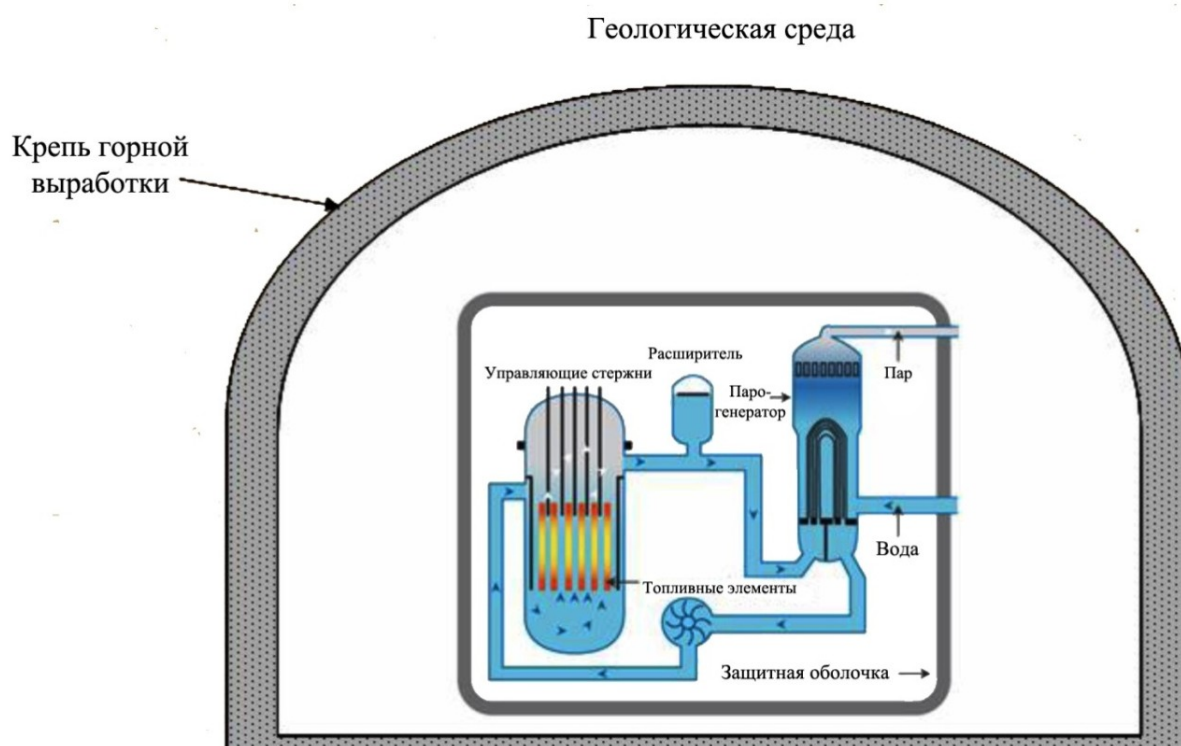
- предотвращение миграции радионуклидов в окружающую среду;
- передача тепла и его рассеивание во вмещающем породном массиве;
- защита от проникновения поверхностных и подземных вод;
- ограничение распространению деформаций и разрушений элементов приконтурной зоны породного массива;
- компенсации механических напряжений при статических нагрузках.

Требования к минеральным материалам, используемым в качестве инженерных барьеров, определяются конкретной областью применения. В качестве основных можно сформулировать следующие: радиационная стойкость, пожаробезопасность, коррозионная стойкость, сорбционные свойства, гидроизоляционные характеристики, возможность механической транспортировки, обеспечение отвода тепла, отсутствие газовыделения, способность к отводу газов. Кроме того, для каждой выбранной геологической среды при разработке технических решений необходимо использовать хорошо изученные и апробированные конструкционные материалы [1].

Следует отметить, что в многобарьерной защите общепринятое современное представление о роли крепей, обделок и строительных конструкций подземных сооружений (например, при подземном размещении радиоактивных отходов), используемых в качестве изолирующего элемента, не придает какого-либо серьезного значения инженерной защите со ссылкой на их возможную деструкцию в начальный период функционирования радиационно опасных объектов.

Безусловно, эффективность барьеров во многом связана со временем их функционирования и по этой причине следует учитывать, что конструкционные материалы при длительном использовании в определенной степени могут быть подвержены разрушению при одновременном изменении физико-механических свойств [2].

В настоящее время разработан и используется большой ассортимент современных конструкционных материалов на основе бетонных смесей с высокими прочностными и гидроизоляционными свойствами. Обоснованный подбор составляющих бетона (цемент, заполнитель, добавки), предназначенных для крепей и строительных конструкций, позволяет эффективно использовать эти компоненты в качестве инженерных барьеров. Принципиальная схема расположения реакторной установки в подземных условиях показана на рисунке.



Принципиальная схема расположения реакторной установки в горной выработке [3]

Долговечность и надежность инженерных барьеров зависит от используемых материалов и технологий их формирования. При этом применяемый изолирующий материал должен способствовать полному устранению или существенному ограничению потока грунтовых вод, а также противостоять действию высоких температур и за счет переноса тепла в породный массив обеспечивать температурный режим, соответствующий санитарно-гигиеническим нормам.

С учетом указанных требований материалы для искусственных барьеров радиационно опасных объектов как исходное сырье для строительства подземного комплекса, встроенных конструкций и крепей и обделок должны характеризоваться следующими основными свойствами:

- большое гидравлическое сопротивление (низкая гидравлическая проводимость);
- высокая механическая прочность;
- достаточная пластичность, чтобы барьер мог выдерживать относительные смещения;
- стойкость и долговечность, то есть способность сохранять заданные свойства в течение всего предусмотренного срока существования радиационно опасного объекта;
- приемлемая стоимость.

Бетон как материал для радиационной защиты стал применяться одновременно с началом строительства первых ядерных установок различного назначения. В настоящее время в России и за рубежом разработано большое количество бетонов для радиационной защиты на различных составляющих. При этом бетоны различаются по плотности, классу прочности, виду используемых заполнителей и вяжущего, содержанию в них специальных защитных материалов или химических элементов, диапазону рабочих температур, технологическим характеристикам. Широкое применение при строительстве АЭС нашли обычные тяжелые и особо тяжелые бетоны [4].

Бетон в этом случае должен иметь следующие характеристики:

- прочность на сжатие — В22,5–В30;
- прочность на осевое растяжение — В_т1,6–В_т2,4;
- прочность на растяжение при изгибе — В_{из}2,4–В_{из}3,3;
- водонепроницаемость — W6–W8;
- объемная масса — Д2200–Д2400.

При использовании строительных конструкций и крепей в качестве инженерных барьеров, наряду с прочностными свойствами и проницаемостью, исключительное значение имеет их долговечность. В соответствии с нормативными требованиями система инженерных барьеров на протяжении эксплуатации подземного комплекса, включая постэксплуатационный период, должна обеспечивать радиационную безопасность без учета защитных свойств геологической формации (породной среды).

Конструктивные элементы, предназначенные для размещения АСММ, а также крепи возводятся с использованием бетонов, подверженных воздействию внешней среды, поэтому с течением времени в них развиваются коррозионные процессы. Чтобы избежать развития подобных процессов или замедлить их протекание, рекомендуется принимать специальные меры по повышению долговечности бетона. Увеличение сроков эксплуатации железобетонных конструкций подземных сооружений в первую очередь может быть достигнуто за счет использования наиболее стойких по отношению к коррозии цементов, так как именно цементный камень, как наиболее химически активный компонент бетона, особенно подвержен разрушающему воздействию агрессивной среды.

При разработке эффективных материалов инженерной защиты для подземного комплекса АСММ необходимо учитывать, что в арктическом регионе, в частности на Кольском п-ове, сосредоточены крупные месторождения различных видов минерального сырья, в том числе горных пород, пригодных для производства щебня. Существует также реальная возможность полить данный инертный заполнитель бетона из вскрышных пород на предприятиях горнодобывающего комплекса, что существенно повысит экономическую эффективность и физическую привлекательность строительства.

Внутренним инженерным барьером, обеспечивающим безопасную эксплуатацию АСММ, в определенной степени может быть также гермооболочка (герметичная оболочка; защитная оболочка; гермозона, контеймент) ядерной энергетической установки. Это пассивная система безопасности, главной функцией которой является предотвращение выхода радиоактивных веществ в окружающую среду при тяжелых авариях. Защитная оболочка представляет собой массивное сооружение специальной конструкции, в котором располагается основное оборудование реакторной установки [5, 6].

Вместе с тем, подземное размещение АСММ позволяет исключить сложную систему защитной оболочки, которая применяется на наземных атомных станциях. Защитную функцию этой системы безопасности может выполнять комплекс подземных выработок, позволяющий локализовать последствия различных внутренних инцидентов и внешних воздействий. Учитывая это, природно-техническая система «геологическая формация — инженерный барьер» является первостепенным элементом обеспечения безопасности подземного комплекса АСММ.

Таким образом, подземное размещение атомных станций малой мощности в условиях арктического региона России позволит обеспечить гарантированный уровень безопасности альтернативного источника энергообеспечения, особенно в районах со сложными климатическими, горно-геологическими и транспортными условиями. Основная концептуальная идея сооружения АСММ заключается в создании безопасных подземных комплексов, в структуре которых окружающий породный массив используется как основной защитный барьер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Научные и инженерные аспекты безопасного захоронения радиационно опасных материалов на Европейском Севере России / Н. Н. Мельников [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. 305 с.
2. Смирнов Ю. Г., Орлов А. О. Анализ мирового опыта строительства подземных атомных станций и оценка возможности его использования для арктических регионов России // Вестник МГТУ: труды Мурманского государственного технического университета. 2016. Т. 19, № 1/1. С. 47–52.
3. Типичные схемы ядерных реакторов. URL: <http://myelectro.com.ua/92-atomnaya-energetika/137-tipichnye-skhemu-yadernykh-reaktorov> (дата обращения: 01.12.2016).
4. Строительство атомных электростанций: учеб. пособие для студентов строительных вузов / В. Б. Дубровский [и др.]. М.: Энергия, 1979. 232 с.
5. Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 02.12.2016).
6. Глоссарий для подготовки официальных сообщений для населения по вопросам риска в случае ядерных/радиационных аварий / АО «Концерн Росэнергоатом». URL: <http://glossary.ibrae.ac.ru/index.php/> (дата обращения: 02.12.2016).

Сведения об авторах

Смирнов Юрий Геннадьевич — научный сотрудник Горного института Кольского научного центра РАН

E-mail: smirnov@goi.kolasc.net.ru

Орлов Александр Орестович — научный сотрудник Горного института Кольского научного центра РАН

E-mail: aleor@goi.kolasc.net.ru

Author Affiliation

Yuriy G. Smirnov — Researcher, Mining Institute KSC RAS

E-mail: smirnov@goi.kolasc.net.ru

Alexander O. Orlov — Researcher, Mining Institute KSC RAS

E-mail: aleor@goi.kolasc.net.ru

Библиографическое описание статьи

Смирнов, Ю. Г. Многобарьерная система безопасности при строительстве и эксплуатации подземных атомных станций малой мощности в условиях Российской Арктики / *Ю. Г. Смирнов, А. О. Орлов* // Вестник Кольского научного центра РАН. 2017. — № 1 (9). — С. 93–98.

Reference

Smirnov Yuriy G., Orlov Alexander O. Multi-Barrier Safety System for Construction and Exploitation of Underground Small Nuclear Power Plants Under the Russian Arctic Conditions. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1 (9), pp. 93–98 (In Russ.).

УДК 622.5

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СУЛЬФАТОВ В СТОЧНЫХ ВОДАХ ГОРНОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В. А. Маслобоев¹, В. Е. Вигдергауз¹, Д. В. Макаров¹, А. В. Светлов¹,
Д. А. Некипелов¹, С. Г. Селезнев²

¹ФБГУН Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

²ООО «Координационный Центр Геологоразведка», Санкт-Петербург

Аннотация

Представлен обзор различных методов очистки от сульфатов сточных вод горнорудных предприятий на основе отечественного и зарубежного опыта. Проведено экономическое и техническое сравнение способов. Для очистки локальных участков с повышенной концентрацией сульфатов перспективны реагентные методы, а также использование сульфатредуцирующих бактерий. В более крупных масштабах экономичным решением представляется использование геохимических барьеров.

Ключевые слова:

горнорудные предприятия, сульфаты, методы очистки сточных вод, экономические показатели очистки воды.

THE METHODS OF REDUCING SULPHATE CONCENTRATIONS IN THE WASTE WATER OF MINING ENTERPRISES

Vladimir A. Masloboev¹, Vladimir E. Vigdergauz¹, Dmitriy V. Makarov¹, Anton V. Svetlov¹,
Dmitriy A. Nekipelov¹, Sergey G. Seleznev²

¹Institute of Industrial North Ecology Problems of the KSC of the RAS

²Coordination Center "Geologorazvedka" LLC, St. Petersburg

Abstract

The review of various methods of treatment of sulphate in mine effluents on the basis of domestic and foreign experience, is presented. Economical and technical aspects of methods are compared. Sulfate-reducing bacteria could be used as method to clear the local areas with high concentrations of sulfates, reagent methods are also promising. Geochemical barriers are cost-effective solution to use on a larger scale.

Keywords:

mining companies, sulphates, methods of mine effluent treatment, economic indicators of water treatment.

Введение

Одной из важнейших экологических задач в деятельности предприятий горной промышленности является очистка сточных вод. Основная сложность заключается в том, что необходимо очищать большие объемы воды. Это приводит к высоким экономическим и материальным затратам при реализации различных схем очистки. Кроме того, сточные воды представляют собой сложные многокомпонентные системы, в состав которых кроме растворенных веществ, входят коллоиды, твердые взвешенные вещества неорганического и органического происхождения.

Основными загрязнителями сточных вод предприятий горнопромышленного комплекса являются тяжелые металлы, повышенная кислотность (acid mine drainage) или щелочность, соли, оксиды, взвешенные вещества и т. д.

Загрязнение карьерных, подотвальных и шахтных вод связано с окислением неустойчивых в гипергенных условиях минералов, прежде всего сульфидов. Одним из факторов, интенсифицирующих процессы гипергенеза, является активация поверхности минералов, протекающая при их дроблении и измельчении в процессе добычи и подготовки к обогащению. В результате объектами загрязнения поверхностных вод выступают: хвостохранилища; отвалы, в т. ч. терриконы угольной отрасли; действующие и заброшенные горные выработки; природные обнажения сульфидсодержащих пород и др.

Кроме того, проходка горных выработок с использованием буровзрывных работ, как правило, сопровождается загрязнением рудничных вод соединениями азотной группы. Основным компонентом применяемых взрывчатых веществ является нитрат аммония, к нему в качестве добавок могут быть использованы нитрометан, нитрит натрия и др. Ион аммония в хозяйственно-бытовых сточных водах быстро разлагается, и очистка от него не представляет большой сложности, однако в шахтных водах, в силу специфичности условий, он накапливается и становится одним из основных загрязнителей.

С буровзрывными работами также связано загрязнение карьерных и рудничных вод взвешенными веществами, которые образуются в процессе разрушения горных пород при бурении шпуров, непосредственно при взрыве и далее при уборке и транспортировке горной массы после проведения взрывных работ.

По сравнению с растворенными тяжелыми металлами и кислотностью (acid mine drainage) экологический вред сульфат-ионов не так велик и, таким образом, его контролю и регулированию уделяют существенно меньшее внимание. Допустимые пределы в разных странах отличаются в разы, минимальные для питьевой воды в США — менее 500 мг/л, в некоторых странах — 1500 мг/л, ВОЗ установлен предел 250 мг/л (табл. 1). Для России в СанПиН 2.1.4.1074-01 (Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества) установлена величина ПДК 500 мг/л по содержанию сульфат-ионов, поступающих в источники водоснабжения.

Таблица 1

Мировые стандарты максимальных концентраций сульфатов
в бытовых и сточных водах, мг/л [1, 2]

Страна	Концентрация	Страна	Концентрация
Россия	500	Евросоюз	1 000
США	500	ЮАР	600
Канада	1 500	Австралия	1 000

Для стоков сложного переменного состава используются комбинированные способы очистки: механические, реагентные, сорбционные, электрохимические и другие физико-химические методы [3–9 и др.]. Реагентные методы включают нейтрализацию кислот и щелочей, перевод ионов в малорастворимое состояние и др., сорбционные — заключаются

в выделении органических и неорганических загрязнений на природных или синтетических сорбентах, а также в использовании ион-селективных материалов. К электрохимическим методам относят электродиализ и электрохимическое окисление.

Реагентная очистка от сульфатов

Реагентная очистка является одним из эффективных методов очистки сточных вод от примесей, при этом крупные частицы примесей осаждаются под действием силы тяжести, а для осаждения тонкодисперсных частиц (-10 мкм) используют коагуляцию.

В качестве коагулянта широко используют известковое молоко $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Кальций — активный металл, вытесняющий тяжелые металлы из растворимых соединений, переводя их в нерастворимые. При этом осаждаются различные соли, в том числе фосфаты, сульфаты, хлориды. Степень осаждения будет определяться величиной pH среды (рис. 1).

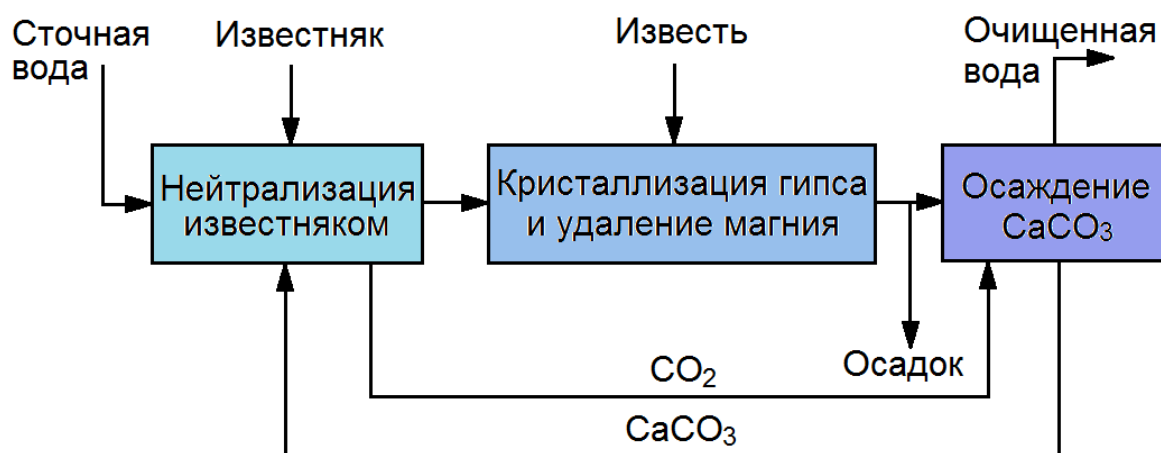


Рис. 1. Схема реагентной очистки известняком/известью [1]

Наиболее широко применяемыми реагентами для осаждения сульфатов, наряду с известью, являются соединения бария: BaCO_3 , BaS и $\text{Ba}(\text{OH})_2$ [1, 2].

В способе, запатентованном авторами [10], очистку сточных вод осуществляют в две стадии. Сначала сточные воды обрабатывают известковым молоком до pH 7,5–8,0. После отделения выпавшего осадка карбонат бария вводят в осветленную воду и выдерживают полученную суспензию при перемешивании до превращения его в сульфат бария. Когда обменная реакция завершена, осадок сульфата бария отделяют от воды. Изобретение позволяет очищать кислые сточные воды от сульфатов тяжелых металлов ниже значений ПДК и резко снизить остаточное солесодержание в очищенной воде ниже 0,2 г/л, что позволяет возвращать очищенную воду в производственный цикл.

Известен ряд способов очистки сточных вод от сульфат-ионов путем нейтрализации воды известковым молоком с применением различных алюминийсодержащих реагентов: AlCl_3 , $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$, NaAlO_2 [11].

Для очистки сточных вод от сульфат-ионов предложено использовать гидроксид алюминия аморфной структуры, извлеченный из кислого раствора алюминиевой соли [12]. При этом сточную воду сначала подщелачивают до pH 12,2–12,4 и осветляют. Далее в осветленную воду вводят гидроксид алюминия аморфной структуры. После этого проводят дополнительное подщелачивание воды до pH 12,7–13,0 при непрерывном перемешивании до завершения

осаждения ионов SO_4^{2-} . Способ обеспечивает очистку сточных вод от сульфат-ионов до ПДК, регламентируемой для сброса очищенных сточных вод в объекты рыбохозяйственного пользования.

В качестве реагента предложено использовать осадок водопроводных станций, образующийся на стадии осветления природных вод коагуляцией и содержащий Al_2O_3 — 18–33 %, CaO — 0,4–24 % [13].

Запатентован способ очистки сточных вод от сульфат-ионов, включающий нейтрализацию сточной воды и введение глиноземистого цемента [14]. Перед введением цемента сточную воду обрабатывают известковым молоком до pH 10,5–12. Цемент вводят в виде 5–12,5 %-й водной суспензии и добавляют флокулянт на основе высокополимеризованного полиакриламида. Изобретение позволяет упростить технологию и сократить время очистки до концентрации сульфат-ионов не более 100 мг/дм^3 , регламентируемой для сброса воды в водоемы рыбохозяйственного назначения.

В 1999 г. Дж. Р. Смит предложил технологию удаления сульфатов осаждением в составе этtringита ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), названную SAVMIN-процессом [15] (рис. 2). Подготовительный процесс включает трехстадийное последовательное удаление металлов в форме гидроксидов путем добавления извести до pH 12. Далее следует удаление гипса путем фракционной кристаллизации и добавление гидроксида алюминия для образования нерастворимого этtringита. На заключительной стадии для снижения pH добавляют углекислый газ и осаждают чистый карбонат кальция. Этtringит в дальнейшем может быть утилизирован либо растворен в серной кислоте для регенерации гидроксида алюминия. Технология прошла успешные промышленные испытания в Южной Африке, в ходе которых было переработано 500 м^3 воды с первоначальной концентрацией сульфат-ионов 800 мг/л , в дальнейшем сниженной до менее 200 мг/л .

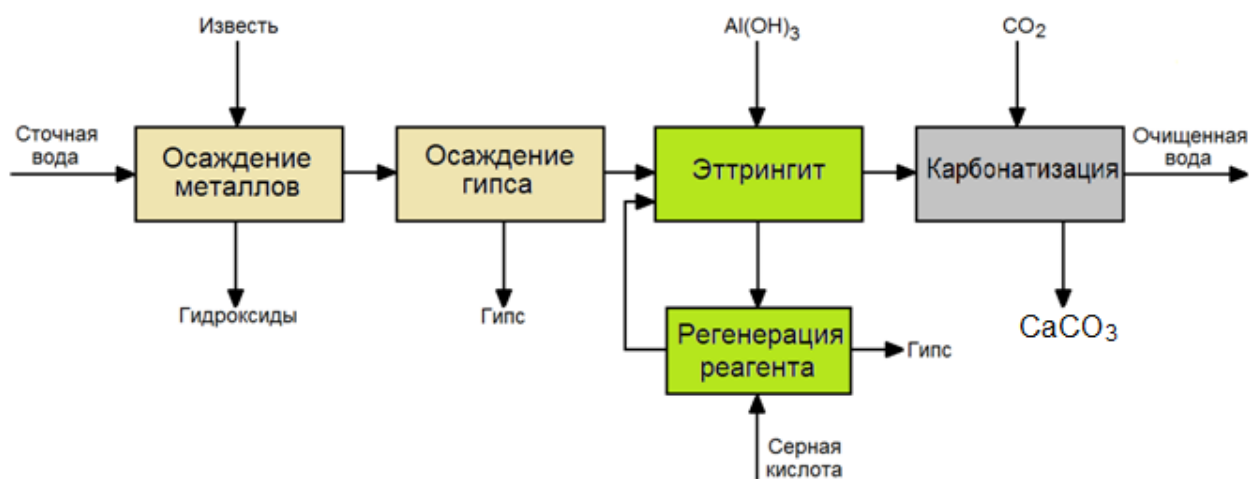


Рис. 2. Схема SAVMIN-процесса [1]

В способе, описанном в [16], сточные воды фильтруют через сорбент, в качестве которого используют гранит, при этом сорбент подвергают воздействию ионизирующего излучения при поглощенной дозе от 550 до 600 кГр. Как заявляют авторы, способ обеспечивает одновременную очистку сточных вод от ионов тяжелых металлов, растворенных нефтепродуктов и сульфатов до значений, меньших 0,5 ПДК.

Биохимическая очистка от сульфатов

Перспективными являются способы биохимической очистки сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов и сульфат-ионы, с восстановлением их до нерастворимых в воде соединений. Процесс заключается в пропускании сточных вод (периодически или непрерывно) через пористую матрицу с микрофлорой, включающую определенные виды сульфатредуцирующих бактерий. Имобилизация осуществляется по принципу адсорбции на анаэробном фильтре [1, 2, 17, 18]. Сульфатредуцирующие бактерии — многообразная физиологическая группа микроорганизмов, различающихся по морфологии клеток и биохимическим свойствам. Они относятся к строгим анаэробам, однако за последнее время появились сведения о способности клеток этих бактерий сохранять жизнеспособность при 6 % молекулярного кислорода в среде развития.

При осуществлении комплексной очистки промышленных сточных вод было предложено смешивать в определенных пропорциях стоки различных производств (например, производства синтетических жирных кислот и гальванического производства) для получения достаточного питания для сульфатредуцирующих бактерий и осаждения тяжелых металлов [19, 20].

Основные преимущества применения биогенного сероводорода (по сравнению с реагентными методами) [19, 21]:

- более низкие затраты на единицу произведенного сульфида;
- снижение концентраций сульфатов в сточной воде до нормы сброса в канализацию;
- отсутствие дополнительного загрязнения и засоления воды;
- исключение стадий погрузки-разгрузки и хранения вредных сульфидных реагентов.

Культивирование сульфатредуцирующих бактерий и генерация ими сероводорода осуществляется в аппаратах различных конструкций, но исключительно в анаэробных условиях. Анаэробные процессы биоочистки характеризуются компактностью аппаратного оформления, минимальным количеством активного ила (на порядок ниже, чем в аэробных) и отсутствием энергозатрат на аэрацию [19, 22]. Эти преимущества, а также достигнутая за последние десятилетия многократная интенсификация процесса (за счет совершенствования современных реакторных конструкций) обусловили большой интерес к анаэробным технологиям и их активное внедрение в зарубежных странах. На сегодняшний день разработаны различные биохимические технологии очистки промышленных сточных вод, основанные на процессе анаэробной сульфатредукции.

Ведущая в этой области голландская компания запатентовала биохимическую технологию очистки сточных вод от сульфатов с получением биогенного сероводорода непосредственно на очистных сооружениях с переводом его избытка в элементарную серу (Тиораq-процесс). Первая промышленная установка производительностью 960 м³/сут была запущена в эксплуатацию в 1992 г. на цинковом заводе компании Budelko (Нидерланды) для извлечения сульфатов цинка и кадмия из грунтовых вод. В качестве питания микроорганизмов и донора электронов используется газообразный водород [19, 23].

Канадская компания BioteQ построила биохимическую установку на руднике Caribou, также работающую на водороде, для извлечения металлов и восстановления сульфатов (BioSulfide-процесс) из кислых шахтных вод производительностью 700 м³/сут [24].

В 2001 г. компании BioteQ и Raques Bio System BV предложили совместную технологию (BioSulfide-Тиораq-процесс), которая положена в основу разработки второй очереди биохимических очистных сооружений рудника Caribou производительностью 2100 м³/сут [23].

Главной особенностью технологии BioSulfide-Thiораq-процесс является применение газаносителя, в первую очередь N₂ и CO₂, для транспортирования биогенного сероводорода из биореактора в реактор смешения с потоком очищаемой сточной воды, а также превращение избытка сульфидов в серу, которая также может быть использована как сырье для продуцирования биогенного сероводорода [19].

Основные недостатки этой технологии:

- усложнение процесса из-за применения системы рециркуляции газа;
- адаптация биомассы к чистым субстратам (водород, этанол, метанол, лактат и др.), что приводит к удорожанию всей разработки [19].

Преимуществом технологии BioSulfide-Thioraq является то, что биомасса не подвергается ингибирующему действию растворенных тяжелых металлов, высоких концентраций растворенных солей и других вредных субстанций [23].

Для повышения эффективности способов биохимической очистки с использованием сульфатредуцирующих бактерий необходим высокий уровень активности роста бактерий. С целью создания нужной концентрации сульфатредуцирующих бактерий в процессе очистки сточных вод от сульфатов и ионов тяжелых металлов добавляют легко усвояемое органическое питание для бактерий [24, 25] или используют специально подобранные консорциумы микроорганизмов [26]. Авторами [27] из речных донных отложений выделен штамм бактерий *Desulfovibrio oxamicus* ВКМ В-2465 Д, характеризующийся высокой степенью очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов при повышенных концентрациях сульфатов. Степень очистки от сульфатов составляет 80 %.

Опреснение шахтных вод как способ очистки от сульфатов

Основные методы опреснения [28]:

- термические — с использованием высоких (дистилляция) и низких температур (замораживания);
- мембранные — электродиализный и обратноосмотический; ионообменный.

К достоинствам как термических, так и мембранных методов опреснения воды можно отнести то обстоятельство, что они позволяют избавиться от общей минерализации и тяжелых металлов.

Хотя ни один из названных методов не является универсальным, каждый весьма эффективен для определенных условий.

Рассмотрим подробнее термические методы опреснения. Термическое опреснение связано с изменением агрегатного состояния минерализованной воды при ее нагревании. Молекулы кипящей воды вследствие тепловых и колебательных движений приобретают энергию, которая превышает силы межмолекулярного притяжения, вследствие чего молекулы отрываются от поверхности воды, образуя пар. Ионы солей малоподвижны и остаются в рассоле. Пар при давлении до 5 МПа не растворяет минеральные соли. Этот процесс получил название дистилляции [28].

При понижении температуры плотность опреснения воды увеличивается, образуются кристаллы льда с вытеснением рассола. Одновременно из перенасыщенного раствора выпадают соли. При оттаивании льда образуется опресненная вода [28].

Процесс дистилляции является в настоящее время более разработанным, поэтому он получил широкое распространение при опреснении морских, а также сточных вод в ряде отраслей промышленности. Проведенные исследования показали, что при солесодержании шахтных вод более 3 г/л и значительной производительности (более 15 тыс. м³/сут) применение дистилляционного метода более экономично, чем использование ионного обмена или электродиализа. Сейчас создан ряд дистилляционных аппаратов, отличающихся условиями процесса, регенерации тепла, конструкцией и т. д. По принципу действия дистилляционные установки разделяют на адиабатные, тонкоплочные, гигроскопические и др. Адиабатные

испарители — аппараты мгновенного вскипания являются наиболее совершенными. Впервые адиабатная опреснительная установка для очистки минерализованных шахтных вод была построена в 1971 г. на шахте «Терновская» ПО «Павлоградуголь» [28].

Расходы на производство опресненной воды методом дистилляции слагаются из капитальных затрат (с учетом системы энергоснабжения) — 40–55 %, стоимости тепловой и электрической энергии — 30–50 %, затрат на реагенты, персонал и прочие затраты — 20–30 % [28].

Учитывая накопленный опыт применения опреснительных установок в нашей стране и за рубежом, а также положительные результаты исследований по утилизации рассолов, образующихся при термической деминерализации шахтных вод хлоридно-натриевого типа, разработана технология для головной промышленной установки на шахте «Красноармейская-Западная» № 1 ПО «Красноармейскуголь» по безотходной термической деминерализации шахтных вод производительностью 7,2 тыс. м³/сут [29].

Технологическая схема установки включает в себя очистку шахтных вод от взвешенных веществ с содержанием 30 г/л, подкисление соляной кислотой и декарбонизацию, подогрев в системе подогревателей, меловую заправку и опреснение в 10-корпусной прямоточной испарительной установке. Образующийся при испарении водяной пар конденсируется и в виде дистиллята направляется потребителю, а рассол подается на кристаллизацию хлорида натрия в выпарные аппараты с принудительной циркуляцией раствора. Годовой выход продуктов: дистиллят — 2,2 млн м³, хлорид натрия — 45 тыс. т, хлорид кальция — 5 тыс. т, оксид магния — 0,56 тыс. т, мел и гипс — 1,5 тыс. т [29].

В реализации и усовершенствовании дистилляционного метода основные усилия направлены на повышение эффективности различных типов выпарных аппаратов и снижение тепловых затрат за счет использования вторичного тепла и дешевой тепловой энергии, вырабатываемой атомными электростанциями. Анализ современных тенденций в технологии опреснения морской воды показывает, что многостадийные испарители с вертикальными трубами работают надежнее других и более предпочтительны в отношении предотвращения образования накипи. Интенсивно развиваются методы дистилляции, основанные на применении пленочных испарителей в восходящем и нисходящем потоках, а также горизонтально-трубчатых пленочных испарителей. Сжатие пара, использование тепла вторичного пара применяется в условиях ограниченных ресурсов тепловой энергии для средних и малых установок [29].

Важной проблемой при дистилляционном методе опреснения минерализованных вод является необходимость предотвращения отложений сульфата кальция (сульфатной накипи) на поверхности теплообмена. Кроме того, основной недостаток метода дистилляции — его высокая энергоемкость. Опреснение вымораживанием в промышленных масштабах для шахтных вод не применяется [28].

Мембранные методы очистки шахтных вод от сульфатов

Очистка воды от сульфатов методом обратного осмоса. Обратный осмос применяют для обессоливания воды в системах водоподготовки, в системах локальной обработки сточных вод при небольших их расходах для концентрирования и выделения относительно ценных компонентов и для очистки природных и сточных вод. Обратный осмос — процесс фильтрования (концентрирования) растворов под давлением через микропористые мембраны с тонкими порами ~ 10⁻⁷ см.

Одним из преимуществ обратноосмотического оборудования является независимость результата очистки от исходного солевого содержания очищаемой воды [30]. Обратноосмотические установки исключают применение агрессивных химических реагентов, что делает их

В. А. Маслобоев, В. Е. Вигдергауз, Д. В. Макаров, А. В. Светлов, Д. А. Некипелов, С. Г. Селезнев экологически чистыми. Процесс обратного осмоса представляет собой перетекание воды через полупроницаемые мембраны из более концентрированного в менее концентрированный раствор под воздействием высокого давления, превышающего разницу осмотических давлений этих двух растворов. Размер пор мембраны и особенности ее физико-химического строения определяют возможность проникновения через мембрану только молекул воды и некоторых газов. Таким образом, осуществляется разделение потока поступающей загрязненной воды на два, один из которых представляет собой чистую воду, другой — водный раствор с не прошедшими мембрану загрязнениями. В результате очистки воды на обратноосмотических установках происходит практически полное ее избавление от примесей — как сульфатов, так и азота аммонийного, железа, нитратов, хлоридов, кальция и магния.

Для воды с низким содержанием кальция (< 100 мг/л) и сульфатов (< 700 мг/л) используют обычный обратный осмос. Для очистки шахтных вод при более высоких концентрациях были предложены модифицированные методы, в частности, обратный осмос с затравкой (SPARRO) [1, 2, 31–33]. Обратный осмос с затравкой способствует осаждению CaSO_4 до мембранной очистки, уменьшению коррозии стенок мембраны и загрязнения осадками солей (рис. 3).

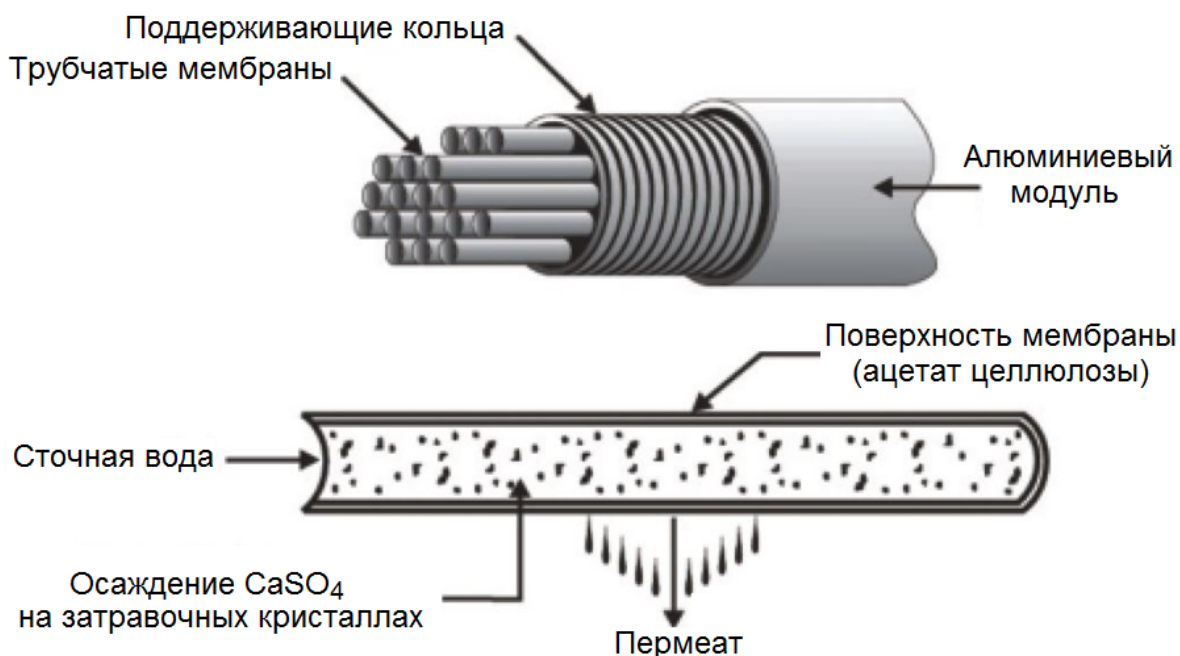


Рис. 3. Схема обратного осмоса с затравкой [1]

В этом методе используют суспензию с кристаллами затравки, вводимую в сточные воды. Поскольку суспензия примерно на 10 % состоит из твердых веществ (кристаллов), необходимо применять трубчатые мембранные элементы, так как полые волокна непригодны из-за обрастания. Процесс SPARRO (Slurry Precipitation and Recycle Reverse Osmosis) был запатентован У. Пуллесом с соавторами в 1992 г. [32]. Пилотные испытания технологии, включавшей предварительное осаждение металлов повышением pH до 10 с последующим охлаждением, фильтрацией и восстановлением pH до 5–6 для защиты мембранного процесса, проводили в ЮАР в течение 5 000 часов. В результате обработки извлечение очищенной воды составило 96 % со снижением концентрации сульфат-ионов с 6 600 до 150 мг/л.

Очистка воды от сульфатов методом ионного обмена

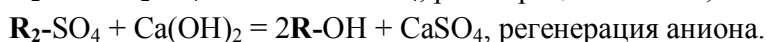
Метод ионного обмена основан на применении катионитов и анионитов, сорбирующих из обрабатываемых сточных вод катионы и анионы растворенных солей. В процессе фильтрования обменные катионы и анионы заменяются катионами и анионами, извлекаемыми из сточных вод. Это приводит к истощению обменной способности материалов и необходимости их регенерации. Наибольшее практическое значение для очистки сточных вод приобрели синтетические ионообменные смолы — высокомолекулярные соединения, углеводородные радикалы которых образуют пространственную сетку с фиксированными на ней ионообменными функциональными группами. Ионообменные смолы представляют собой материалы, содержащие большие полярные обменные группы. Процесс заключается в обмене ионов или молекул между твердой и жидкой фазами без существенных изменений в структуре твердой фазы. Один из целевых ионов, по сути, удаляется из жидкой фазы и прикрепляется к твердой фазе в обмен на другой ион (обычно водорода или гидроксила); таким образом, целевой ион становится неподвижным.

Для очистки воды от сульфатов нашли применение анионообменные смолы сильного основания [30]. Анионитами являются смолы, извлекающие из воды анионы соединений с определенной избирательностью — характеризуются относительным родством в отношении удаляемых ионов по следующему ряду:



Условие протекания реакций обмена анионов между смолой и водным раствором — расположение анионов, содержащихся в растворе, левее функциональной группы анионов, находящихся в смоле.

В случае CaSO_4 сульфат, будучи анионом, будет заменен на гидроксил на положительно заряженной смоле (анионообменная смола), а катион кальция заменится на водород на отрицательно заряженной смоле (катионообменная смола). Как и в случае обратного осмоса, образование CaSO_4 происходит по известным реакциям. Модифицированный способ ионного обмена для обработки кальциевых сульфатных вод получил название GYP-CIX (Gypsum Ion Exchange) (рис. 4). GYP-CIX — процесс, в котором используют недорогие реагенты, такие как известь и серная кислота, для регенерации смолы [1, 2]. Уменьшение концентрации гипса в сточных водах снижает потенциал коррозии. Кроме того, чистый гипс является товарным продуктом для промышленности строительных материалов и других отраслей. Уравнения реакций:



Электродиализ — метод, основанный на избирательном переносе ионов через перегородки, изготовленные из ионитов (мембраны) под действием электрического тока. Обычно используют пакеты из чередующихся анионо- и катионообменных мембран. Ионообменные мембраны проницаемы только для ионов, имеющих заряд того же знака, что и у подвижных ионов. Изготавливаемые установки типа ЭДУ, ЭХО и др. предназначены для обессоливания природных вод.

Применение реверсирования тока значительно улучшает процесс, при этом меняется полярность электродов (катод становится анодом и наоборот), а камеры обессоливания и концентрирования меняются местами. В ходе переполюсовки с мембран удаляются

В. А. Маслобоев, В. Е. Вигдергауз, Д. В. Макаров, А. В. Светлов, Д. А. Некипелов, С. Г. Селезнев
отложения, образовавшиеся в ходе процесса. Это позволяет свести к минимуму применение ингибиторов осадкообразования и частоту промывок. Основное преимущество реверсивного электролиза (РЭД) над другими методами заключается в том, что система не чувствительна к температуре сточной воды или pH. Капитальные затраты уменьшаются за счет снижения рабочего давления. Однако из-за неправильной предварительной обработки может происходить образование накипи CaSO₄.

К недостаткам мембранных методов относятся их высокая стоимость и энергоемкость.

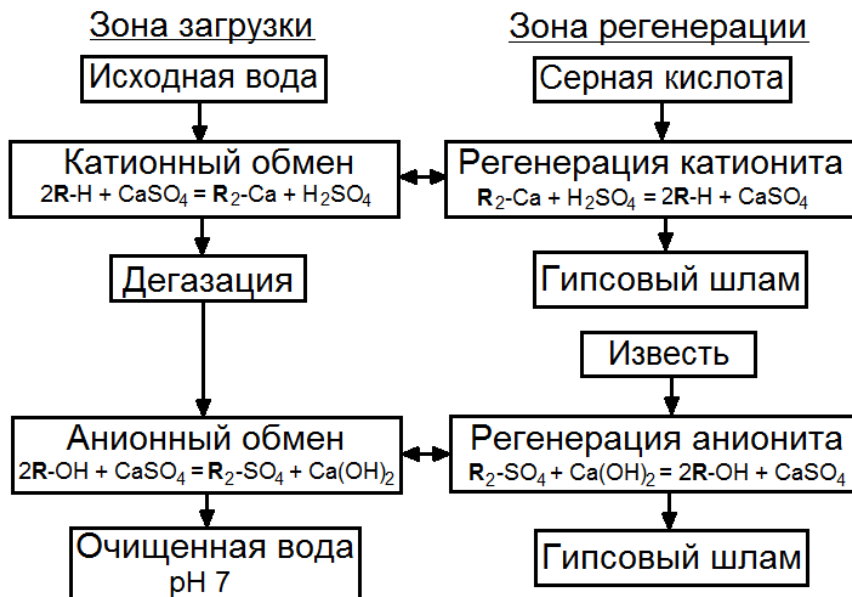


Рис. 4. Упрощенная схема GYP-CIX-процесса [1]

Геохимические барьеры для очистки сточных вод от сульфатов

Среди физико-химических методов заслуживает внимания применение искусственных геохимических барьеров. Геохимические барьеры — такие участки земной коры, в которых на коротком расстоянии происходит резкое изменение физико-химических условий миграции элементов, вызывающее их осаждение [34]. Существует несколько видов геохимических барьеров: механические, физико-химические и биогеохимические.

Зоны и участки геохимических барьеров могут возникать не только самопроизвольно в естественных (или нарушенных) условиях формирования химического состава вод, но и в результате специальных инженерно-технологических мероприятий [35–47]. Многочисленные исследования посвящены разработке методов защиты подземных и поверхностных вод от загрязнения с использованием геохимических барьеров [35–41 и др.]. В качестве материалов для создания барьеров могут быть применены как природные образования (грунты, горные породы, торф и др. и т. д.), так и искусственные, в том числе техногенные отходы (пиритные огарки, отходы содового производства и др.).

В частности, Н. Г. Максимович для нейтрализации кислых (pH = 2–4) высокоминерализованных сульфатных шахтных вод Кизеловского угольного бассейна (Пермская обл.), имеющих в составе повышенные концентрации железа, алюминия, тяжелых металлов и сульфатов, предложил использовать щелочные отходы ПО «Сода» (г. Березники) (щелочной барьер) [42, 43]. В качестве реагента использованы соединения бария (гидроксид, хлорид),

дробленые карбонатные породы, укладываемые в траншеи в зоне стока с отвалов. На созданном искусственном геохимическом барьере сульфаты связываются в сульфат бария — барит (BaSO_4). Образование барита практически не зависит от кислотно-щелочных условий среды, он устойчив в экзогенных условиях, не токсичен (рис. 5).

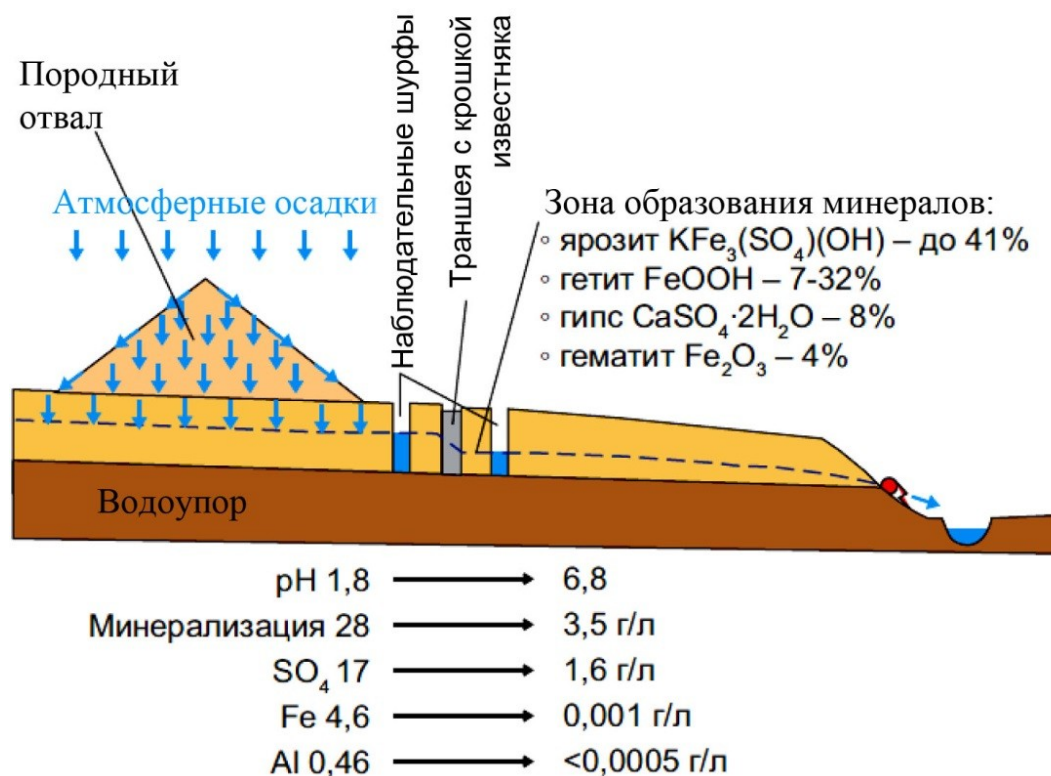


Рис. 5.Схема проведения опытов на участке размещения породного отвала Кизеловского угольного бассейна [43]

Авторы [44] создали изолирующий барьер для хвостохранилищ на основе осадков муниципальных очистных сооружений, модифицированных анаэробными сульфатредуцирующими бактериями. Осадки сточных вод, как правило, содержат значительные количества органических соединений, которые могут использоваться сульфатредуцирующими бактериями и способствовать их размножению и росту. При фильтровании кислых вод через барьер такие загрязняющие вещества, как сульфаты и тяжелые металлы, осаждаются в виде гидроксидов и карбонатов.

Пример успешного использования геохимических барьеров для снижения содержания сульфатов в шахтных водах канадского Онтарио приведен в работе [38]. Использование смеси гравия и компоста для создания зоны биологического восстановления сульфата позволило удалять его со скоростью 14 мг/л в день на протяжении трех лет.

Искусственные болотные экосистемы — биоплато (constructed wetlands)

Биоплато с высшими растениями широко используются для доочистки сточных вод от различных загрязняющих веществ. Данную технологию применяют после первичной очистки стоков механическими и физико-химическими методами. Метод основан на использовании

В. А. Маслобоев, В. Е. Вигдергауз, Д. В. Макаров, А. В. Светлов, Д. А. Некипелов, С. Г. Селезнев природных механизмов очистки сточных вод с помощью макрофитов, произрастающих в водоеме или поблизости его. Этот способ не требует затрат энергии и химикатов, не оказывает дополнительного негативного воздействия на окружающую среду. Обычно биоплато состоит из двух блоков — растительного и фильтрующего; последний представляет собой ложе из щебня, гравия, песка и прочих фильтрующих материалов, которое засаживается водными растениями [45].

Опыт применения биоплато в Швеции, Финляндии, Норвегии, Канаде и России показывает, что искусственно созданные заболоченные территории в качестве сооружений доочистки стоков являются эффективными даже при низких температурах (рис. 6). При этом снижение активности систем незначительно по сравнению с теплым сезоном [45–49]. Изоляция такого заболоченного участка снежным, ледяным и естественным растительным покровом позволяет функционировать даже в зимний период.



Рис. 6. Плавающее биоплато на пруду-отстойнике Кировогорского карьера, АО «Олкон» [49]

В работах [50–53] подробно рассмотрены конструктивные особенности и опыт применения биоплато в различных странах, показаны возможности, и приведены конкретные примеры снижения концентрации сульфат-иона при очистке сточных вод.

Экономическое и техническое сравнение методов снижения концентрации сульфатов в шахтных водах

Обстоятельный обзор применяемых методов удаления сульфатов, включающий как экономическое, так и техническое сопоставление существующих технологий, выполнен Р. Дж. Бовеллом, геохимиком из Уэльса [2]. На основании сопоставления технологических

и экономических преимуществ различных методов автор делает заключение о том, что наиболее перспективными технологиями в настоящее время являются биологическое восстановление сульфатов, SAVMIN и GYP-CIX.

При концентрациях сульфатов менее 2 000 мг/л эффективной и недорогой предварительной операцией по удалению сульфатов является обработка известью. Бовеллом сделан вывод о том, что оптимальные технологические приемы и операции удаления сульфатов будут определяться существующими уникальными горно-химическими условиями [2].

Реагентное осаждение наименее затратно, но приводит к образованию больших объемов побочных отходов. Процесс SAVMIN, хотя и дорогой, является наиболее эффективным из методов осаждения для вод с высоким содержанием сульфатов.

Мембранные и ионообменные процессы, за исключением SPARRO и GYP-CIX, неприемлемы для обработки без интенсивной предварительной подготовки.

В табл. 2 сопоставлены экономические характеристики некоторых технологий по данным [2]. В целом, все методы удаления сульфатов дороги и не всегда эффективны. По мнению Бовелла, наиболее универсальный и широко применимый подход удаления сульфатной серы из стоков горного производства — биологическое восстановление сульфатов, имеющее дополнительное преимущество одновременного удаления сульфат-ионов и металлов.

Таблица 2

Расчет затрат на очистку шахтных вод Grootelwei Proprietary Ltd. (ЮАР) [2]

Показатель	Метод		
	Обратный осмос	РЭД	GYP-CIX
Стоимость, долл/м ³	0,88	0,48	0,6
Годовые эксплуатационные расходы, млн долл.	21,9	9,0	9,6
Удаление рассола, долл/м ³	0,82	1,9	2,5
Годовая экономия (производство питьевой воды), млн долл.	5,5	4,2	3,5
Суммарные годовые эксплуатационные затраты, млн долл.	17,2	6,7	8,6

Примечание. Стоимость рассчитана на производительность 80 тыс. м³/сут.

В табл. 3 представлены экономические и технические показатели применяемых методов для очистки от сульфатов сточных вод горнорудных предприятий.

Анализ данных табл. 2, 3 показывает, что мембранные технологии в большинстве случаев экономически нецелесообразны ввиду больших объемов откачиваемых шахтных вод.

Перспективно использование сульфатредуцирующих бактерий, а в случаях очистки локальных участков с повышенной концентрацией сульфатов это могут быть реагентные методы с применением сульфида бария или извести (табл. 3).

Наиболее экономичным решением представляется использование геохимических барьеров в виде траншеи либо фильтрующей дамбы, в зависимости от инженерно-геологических условий местности (табл. 3), однако данный метод имеет ряд технических ограничений и так же, как и все рассмотренные, не является универсальным.

Таблица 3

Экономические показатели методов очистки воды, их преимущества и недостатки (по данным [1, 2])

Показатель	SAVMIN	GYP-CIX	SPARRO	Биореактор	Осаждение сульфидом бария	Геохимический барьер	Осаждение известью
Предварительная обработка	Нет	Нет	Да	Да	Нет	Нет	Нет
Ограничения по содержанию сульфат-ионов в исходной воде	Любое	Любое	Любое	Любое	Любое	< 2000 мг/л	Любое
Удаление сульфат-ионов, %	> 90	> 95	> 99	> 90	> 98	> 80	50
Образование рассола	Нет	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
Образование шлама	Умеренно-высокое	Умеренное	Низкое	Низко-умеренное	Низкое	Умеренное	Низкое
Капитальные затраты (тыс. долл.) на мощности по переработке, тыс. м ³ /сут	310	330–370	520	240	480	65	Нет данных, низкие
Эксплуатационные затраты, долл./м ³	0,17	0,60	0,22	0,27	0,36	Нет данных	0,10
Преимущества	Низкое содержание сульфатов, регенерация этрингита	Вода питьевого качества	Вода питьевого качества	Удаление следов металлов, оборот CO ₂ и сероводорода	Низкий уровень сульфат-ионов, регенерация дорогостоящего сульфида бария	Удаление следов металлов	Относительно дешево, удаляются следы металлов
Недостатки	Образование шлама	Образование шлама	Время жизни мембран	Образование шлама	Образование шлама	Длительный процесс	Ограниченное снижение концентрации сульфат-ионов, образование шлама

Заключение

Представленное экономическое и техническое сравнение методов снижения концентрации сульфатов в сточных водах показало, что в настоящее время не существует универсальных технологических приемов очистки. Это связано как с объемами сточных вод, так и с их составом и конкретными горно-химическими условиями горнорудных предприятий.

В то же время, вполне вероятно, что развитие методов снижения концентрации сульфатов в сточных водах горнопромышленного комплекса будет идти по пути создания комбинированных физико-химических технологий в сочетании с биотехнологиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. International Network for Acid Prevention (INAP). Treatment of sulfate in mine effluents. Lorax Environmental. 2003. 129 p.
2. *Bowell R. J.* A Review of sulfate removal options for mine waters. URL: http://www.imwa.info/docs/imwa_2004/IMWA2004_43_Bowell.pdf (дата обращения: 20.10.2016).
3. *Снурников А. П.* Комплексное использование минеральных ресурсов в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1986. 384 с.
4. Водное хозяйство промышленных предприятий / под ред. *В. И. Аксенова*. М.: Теплотехник, 2005. 640 с.
5. Очистка производственных сточных вод / *С. В. Яковлев [и др.]*. М.: Стройиздат, 1985. 335 с.
6. *Вурдова Н. Г., Фомичев В. Т.* Электродиализ природных и сточных вод. М.: Изд-во АСВ, 2001. 144 с.
7. *Ксенофонтов Б. С.* Флотационная очистка сточных вод. М.: Новые технологии, 2003. 160 с.
8. Инженерная защита окружающей среды. Очистка вод. Утилизация отходов / под ред. *Ю. А. Бирмана, Н. Г. Вурдовой*. М.: Изд-во АСВ, 2002. 296 с.
9. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы / *М. Хенце [и др.]*; пер. с англ. *Т. П. Мосоловой*; под ред. *С. В. Калюжного*. М.: Мир, 2004. 480 с.
10. Способ очистки кислых сточных вод от сульфатов тяжелых металлов: пат. 2448054 Рос. Федерация / *Куценко С. А., Хрулева Ж. В.* Оpubл. 20.04.2012, Бюл. № 11.
11. *Милованов Л. В.* Очистка сточных вод предприятий цветной металлургии. М.: Металлургия, 1971. 384 с.
12. Способ очистки сточных вод от сульфат-ионов: пат. 2323164 Рос. Федерация / *Ким М. П., Молодчик Г. Л., Агапов А. Е., Азимов Б. В., Навитный А. М.* Оpubл. 27.04.2008, Бюл. № 12.
13. Способ очистки сульфатсодержащих сточных вод: а. с. 1330078 СССР / *Шамраева Ю. К., Павлухина Л. Д., Юркова Е. М., Павлова Е. М.* Оpubл. 15.08.87, Бюл. № 30.
14. Способ очистки сточных вод от сульфат-ионов: пат. 2559489 Рос. Федерация / *Гришин В. П., Макаров О. В., Некряченко С. Г.* Оpubл. 10.08.2015, Бюл. № 22.
15. *Smit J. P.* The purification of polluted mine water // Proc. Intern. Symp. on Mine Water & Environment for the 21st Century. Seville, Spain. 1999.
16. Способ очистки сточных вод: пат. 2433964 Рос. Федерация / *Сватовская Л. Б., Шершнев М. В., Пузанов Е. Е., Шершнев В. А., Иванова А. С.* Оpubл. 20.11.2011, Бюл. № 32.
17. *Букараев А. Д., Русанов А. М., Лантух В. П.* Роль микроорганизмов в очистке сточных вод от тяжелых металлов. Оренбург.: Изд-во ОГУ, 1998. 53 с.
18. *Соложенкин П. М.* Сульфатредуцирующие бактерии в обогащении руд и гидрометаллургии // Горн. инф.-аналит. бюл. МГГУ. 2011. № 9–10. С. 29–36.
19. *Хлебникова Т. Д., Хамидуллина И. В.* Перспективы развития биохимической очистки промышленных сточных вод от сульфатов и ионов тяжелых металлов // Башкир. хим. журн. 2012. Т. 19, № 2. С. 147–155.
20. Биохимическая очистка сульфатсодержащих сточных вод / *В. Е. Губин [и др.]* // Химия и технология воды. 1984. Т. 6. С. 465–467.
21. Biological recovery of metals, sulfur and water in the mining and metallurgical industry / *J. Weijma [et al.]* // Afval water wetenschap. IWA Publishing, 2002. P. 605–622.
22. *Калюжный С. В.* Высокоинтенсивные анаэробные биотехнологии очистки промышленных сточных вод // Катализ в промышленности. 2004. № 6. С. 42–50.
23. Water treatment and metals recycling using biogenic sulfide / *J. Boonstra [et al.]* // Recycling and waste treatment in mineral and metal processing: technical and economic aspects. Lulea. Sweden. 2002. Vol. 1. P. 691–698.
24. Anaerobic treatment of sulfate-rich wastewaters / *P. L. W. Hulshoff [et al.]* // Biodegradation. 1998. Vol. 9, No. 3–4. P. 213–224.
25. Способ биохимической очистки сточных вод от сульфатов: а. с. 857013 СССР / *Зайнуллин Х. Н., Смирнова Г. Ф.* Оpubл. 07.06.1981, Бюл. № 21.
26. Model experiments on the microbial removal of chromium from contaminated groundwater / *M. Vainshtein [et al.]* // Water Research. 2003. Vol. 37. P. 1401–1405.
27. Штамм бактерий *Desulfovibrio oxamicus*, используемый для очистки сточных вод от сульфатов и ионов тяжелых металлов: пат. 2355756 Рос. Федерация / *Смирнов Ю. Ю., Вацурина А. В.* Оpubл. 20.05.2009, Бюл. № 14.
28. *Долина Л. Ф.* Сточные воды предприятий горной промышленности и методы их очистки: справ. пособие. Днепропетровск, 2000. 61 с.
29. Совершенствование природоохранных работ в угольной промышленности: обзор / *В. С. Малышенко [и др.]*; ЦНИЭИуголь. М., 1992. 98 с.
30. Очистка воды от сульфатов / компания «Waterman». URL: <http://water2you.ru/articles/tehnologii-ochistki-vody/ochistka-vody-ot-sulfatov/> (дата обращения: 20.10.2016).
31. *Harries R. C.* A field trial of Seeded Reverse Osmosis for desalination of a scaling type mine water // Desalination. 1985. Vol. 56. P. 227–236.
32. *Pulles W., Juby G. J. G., Busby R. W.* Development of the Slurry Precipitation and Recycle Reverse Osmosis (SPARRO) technology for desalinating mine waters // Water Sci. Tech. 1992. Vol. 25, No. 10.

- В. А. Маслобоев, В. Е. Вигдергауз, Д. В. Макаров, А. В. Светлов, Д. А. Некипелов, С. Г. Селезнев
- Р. 177–192. **33.** *Everitt D. J., Du Plessis J. and Gussman H. W.* The removal of salt from underground mine waters // Mining Environment Management. 1994. No. 3, P.12–14. **34.** *Перельман А. И.* Геохимия. М.: Высш. шк., 1989. 528 с. **35.** *Воробьев А. Е.* Ресурсовоспроизводящие технологии горных отраслей. М.: Изд-во МГГУ, 2001. 150 с. **36.** *Бортникова С. Б., Гаськова О. Л., Бессонова Е. П.* Геохимия техногенных систем. Новосибирск: Гео, 2006. 169 с. **37.** Geochemical barriers for environmental protection and of recovery of nonferrous metals / *V. Chanturiya [et al.]* // J. Environmental Sci. & Health, Part A. 2014. Vol. 49, No. 12. P. 1409–1415. **38.** Geochemistry of a permeable reactive barrier for metal and acid mine drainage / *S. G. Benner [et al.]* // Environmental Science & Technology. 1999. Vol. 33, No. 16. P. 2793–2799. **39.** Mine-water chemistry: the good, the bad and the ugly / *D. Banks [et al.]* // Environmental Geology. 1997. Vol. 32, No. 3. P. 157–174. **40.** *Жижжаев А. М., Брагин В. И., Михайлов А. Г.* Осаждение меди с использованием природных карбонатов кальция // Обогащение руд. 2001. № 5. С. 13–17. **41.** *Изотов А. А., Ковердяев О. Н., Вершинина О. О.* Способы снижения воздействия дренажных вод на окружающую среду в горнодобывающих районах // Горн. журн. 2006. № 10. С. 103–106. **42.** *Максимович Н. Г.* Использование геохимических барьеров для очистки изливов кислых вод Кизеловского угольного бассейна // Инж. геология. 2011. С. 20–25. **43.** *Максимович Н. Г.* Теоретические и прикладные аспекты использования геохимических барьеров для охраны окружающей среды // Инж. геология. 2010. № 3. С. 20–28. **44.** Compacted sewage sludge as a barrier for tailing impoundment / *B. Wang [et al.]* // Environmental Earth Sci. 2010. Vol. 61. P. 931–937. **45.** Микробиологические исследования сточных карьерных вод с целью разработки технологии их очистки от загрязняющих веществ группы азота (нитрит-ионов, нитрат-ионов, ионов аммониевых соединений) до утвержденных нормативов допустимых концентраций: отчет по договору № 27-3-12 от 1 октября 2012 г. / ИППЭС КНЦ РАН. 2013. 29 с. **46.** *Mattila K., Zaitsev G., Langwaldt J.* Biological removal of nutrients from mine waters. Biologinen ravinteiden poisto kaivosvedesta. Final report — loppuraportti. 2007. 99 p. **47.** *Jenssen P. D., Maehlum T., Krogstad T.* Potential use of constructed wetlands for wastewater treatment in northern environments // Water Science Techniques. 1993. Vol. 28, No. 10. P. 149–157. **48.** *Nyquist J., Greger M.* A field study of constructed wetlands for preventing and treating acid mine drainage // Ecological Engineering. 2009. Vol. 35. P. 630–642. **49.** Плавающие биоплато для очистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота в арктических условиях / *Г. А. Евдокимова [и др.]* // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19, № 9. С. 35–41. **50.** *Vymazal J.* Constructed wetlands for wastewater treatment // Water. 2010. Vol. 2. P. 530–549. **51.** *Vymazal J.* Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review // Ecological Engineering. 2014. Vol. 73. P. 724–751. **52.** Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries — A review of recent developments (2000–2013) / *Dong Qing Zhang [et al.]* // J. Environmental Management. 2014. Vol. 141. P. 116–131. **53.** A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation / *Haiming Wu* // Bioresource Technology. 2015. Vol. 175. P. 594–601.

Сведения об авторах

Маслобоев Владимир Алексеевич — доктор технических наук, директор Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

E-mail: masloboev@ksc.ru

Вигдергауз Владимир Евлевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

E-mail: vigderg@mail.ru

Макаров Дмитрий Викторович — доктор технических наук, заведующий лабораторией экологии промышленного производства Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

E-mail: makarov@insep.ksc.ru

Светлов Антон Викторович — младший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

E-mail: svetlov@insep.ksc.ru

Некипелов Дмитрий Александрович — лаборант Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

E-mail: rokishkis@yandex.ru

Селезнев Сергей Геннадьевич — кандидат геолого-минералогических наук, ООО «Координационный Центр Геологоразведка», Санкт-Петербург

E-mail: seleznev.s.ek@mail.ru

Author Affiliation

Vladimir A. Masloboev — Dr. Sci. (Engineering), Director of the Institute of Industrial North Ecology Problems of the KSC of the RAS

E-mail: masloboev@ksc.ru

Vladimir E. Vigdergauz — Dr. Sci. (Engineering), Chief Researcher of the Institute of Industrial North Ecology Problems of the KSC of the RAS

E-mail: vigderg@mail.ru

Dmitriy V. Makarov — Dr. Sci. (Engineering), Head of Laboratory of Industrial Ecology at the Institute of Industrial North Ecology Problems of the KSC of the RAS

E-mail: makarov@inep.ksc.ru

Anton V. Svetlov — Junior Researcher of the Institute of Industrial North Ecology Problems of the KSC of the RAS

E-mail: svetlov@inep.ksc.ru

Dmitriy A. Nekipelov — Laboratory Technician of the Institute of Industrial North Ecology Problems of the KSC of the RAS

E-mail: rokishkis@yandex.ru

Sergey G. Seleznev — PhD (Geology and Mineralogy), Coordination Center “Geologorazvedka” LLC, St. Petersburg

E-mail: seleznev.s.ek@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Методы снижения концентрации сульфатов в сточных водах горнорудных предприятий / *B. A. Маслобоев [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 1 (9). — С. 99–115.

Reference

Masloboev Vladimir A., Vigdergauz Vladimir E., Makarov Dmitriy V., Svetlov Anton V., Nekipelov Dmitriy A., Seleznev Sergey G. The Methods of Reducing Sulphate Concentrations in the Waste Water of Mining Enterprises. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1 (9), pp. 99–115 (In Russ.).

УДК 502.51+502.37

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОРБЕНТОВ ДЛЯ САНАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Л. П. Сулименко, Л. Б. Кошкина, В. А. Маслобоев

ФГБУН Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

Аннотация

Разработаны комбинированные технологии применения синтезированного сорбента на основе местного минерального сырья для очистки сточных и природных вод, почв от нефтезагрязнений, утилизации нефтешламов и ремедиации загрязненных земель в условиях Крайнего Севера. Имобилизация микрофлоры на поверхности сорбента позволяет создать условия для развития на его поверхности популяций биоокислителей и интенсифицировать биохимические процессы в нефтезагрязненных средах. Применение сорбента позволяет значительно ускорить деградацию нефтепродуктов до экологически безопасного состояния. Эффективность применения сорбента подтверждена результатами по очистке от нефтепродуктов в реальных условиях.

Ключевые слова:

сорбент, биodeградация нефтепродуктов, биотехнология, ремедиация нефтезагрязненных земель, очистка стоков.

PRACTICAL ASPECTS OF THE USE OF LOCAL SORBENTS FOR THE RENOVATION OF OIL-CONTAMINATED AREAS

Lyudmila P. Sulimenko, Lyudmila B. Koshkina, Vladimir A. Masloboev

Institute of Industrial North Ecology Problems of the KSC of the RAS

Abstract

The combined technologies of application of the synthesized sorbent on the basis of local mineral raw materials to remove oil-contaminants from soils, wastewater, and natural waters, dispose oil-sludge and remediate contaminated land in the Far North, have been developed. Immobilization of microorganisms on the sorbent surface allows to create conditions for increasing the bio-oxidizers population on its surface and intensify the biochemical processes in oil-contaminated environments. Application of the sorbent allows to accelerate significantly the degradation of oil-products to an environmentally safe state. The sorbent efficiency has been confirmed by the results of oil-products removal in the real-life environment.

Keywords:

sorbent, biodegradation of oil, biotechnology, remediation of oil-contaminated soil, wastewater treatment.

В экспертной оценке Аналитического центра при Правительстве Российской Федерации одной из острых экологических проблем при реализации экологических целей устойчивого развития названы природоохранные аспекты освоения Арктики. При этом подчеркивается,



что любые экономические проекты, прежде всего, должны учитывать экологический фактор и сохранение устойчивости экосистем. В этих условиях очень важно разработать обеспечение экологически безопасного природопользования при развитии промышленности и спрогнозировать

связанные с этим возможные последствия загрязнения окружающей среды.

Освоение Арктики и континентального шельфа Баренцева моря сопровождается развитием инфраструктуры приарктических территорий. Разработка на шельфе нефтегазовых месторождений приводит к загрязнению экосистем Кольского п-ова, поскольку развивается морская транспортная и сопутствующая ей прибрежная система перегрузки нефтепродуктов, железнодорожная и автомобильная составляющая перевозок нефтепродуктов через всю территорию полуострова. Разработка методов очистки нефтезагрязненных почв и сточных вод промышленных площадок становится приоритетной проблемой, которую надо решать с учетом местных условий. Это особенно важно для предприятий, сточные воды которых поступают в водные объекты рыбохозяйственного значения, когда их использование в системе водопользования предприятия требует достижения значений ПДК (предельно допустимых концентраций) при очистке стоков.

Методы очистки природной среды от нефтепродуктов многочисленны, оптимальные условия их использования диктуются экономической целесообразностью и возможностью применения в конкретных условиях [1–3]. В районах Крайнего Севера определяющими являются климатические факторы, для которых характерна низкая скорость процессов самоочищения воды и почв в условиях длительной зимы и короткого лета, низких температур, продолжительности полярной ночи.

Сотрудниками Института проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) КНЦ РАН разработан новый класс металл-углеродных минеральных сорбентов — «Вермосов», получаемых путем обработки природного слоистого алюмосиликата легирующими компонентами с последующим окислительным пиролизом при высокой температуре в контролируемой газовой среде. В результате предварительной термической обработки носителя его удельная поверхность увеличивается до $200 \text{ м}^2/\text{г}$ при объемной плотности $100\text{--}150 \text{ мг}/\text{см}^3$. Различные способы прививки металла модификатора и его природа определяют координацию и структуру лиганда, образующегося на поверхности металлокомплекса, что позволяет варьировать сорбционные и каталитические свойства «Вермосов» в широких пределах и в итоге определяет области их применения [4].

К числу таких металл-углеродных сорбентов по нашей классификации относится «С-верад», предназначенный для сорбционного извлечения нефтепродуктов с водной и твердой поверхности, обладающий высокой емкостью по отношению к некоторым органическим веществам и микроорганизмам. «С-верад» оказывает структурирующее воздействие на пленки из плавающих нефтепродуктов и вязких жидкостей, исключает вторичное загрязнение окружающей среды, экологически безопасен и биостерилен, негорюч, нетоксичен. Отличительными особенностями сорбента являются: широкий температурный диапазон применения и гидрофобность; высокая удельная поверхность при низкой объемной плотности

сорбента; устойчивость к биохимическому разложению [4–8]. Удобен в работе, так как отработанный сорбент после насыщения нефтепродуктами остается в сыпучем состоянии, легко удаляется с поверхности и легко утилизируется. Преимущество сорбента «С-верад» в том, что при отличных сорбционных характеристиках он синтезирован на основе местного минерального сырья, а это, в свою очередь, определяет его относительно низкую стоимость.

Области применения сорбента «С-верад»:

- сбор нефтепродуктов с водной и твердой поверхности с последующей биодegradацией и захоронением;
- фильтрационная очистка промышленных и бытовых сточных вод, ливнеотоков АЗС и автохозяйств;
- утилизация нефтешламов и ремедиация нарушенных земель.

Удаление нефтепродуктов с поверхности акваторий возможно, поскольку при объемной плотности 100–150 мг/см³ и гидрофобности данный сорбент обладает высокой плавучестью [5]. После ограждения нефтяного пятна бонами его поверхность обрабатывается сплошным слоем сорбента и экспонируется на поверхности, затем отработанный сорбент удаляется. Удерживающая способность и плавучесть сорбента зависит от гранулометрии (табл. 1).

Таблица 1

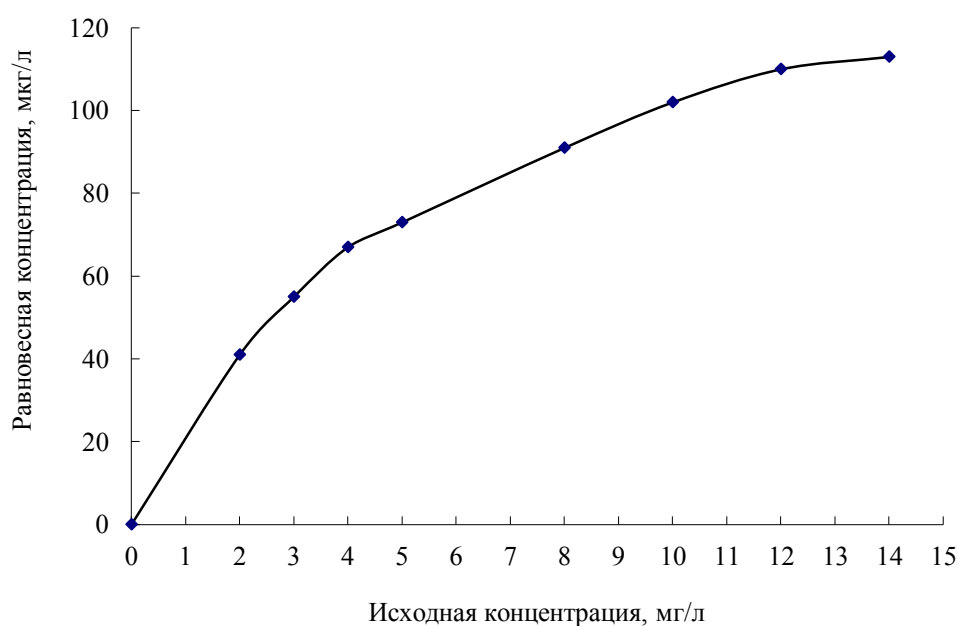
Зависимость удерживающей способности и плавучести от гранулометрии материалов

Размер, мм	Удерживающая способность, г/г				Плавучесть, сут
	мазута	масла технического	дизельного топлива	толуола	
–8...+5	1,9	1,1	1,0	1,0	До 14
–5...+2,5	2,4	2,9	2,2	2,2	До 6
–1,25...+2,5	4,3	3,7	2,9	2,9	До 3
–1,25...+0,63	5,9	3,9	3,3	3,3	До 1
–0,63...+0,35	2,76	2,89	3,15	–	Отсутствует

Выбор гранулометрического состава определяется конкретными погодными условиями. При спокойных погодных условиях используется крупность –1,25...+0,63 мм и осуществляется сбор с водной поверхности, при плохих — нефтяное пятно засыпается сорбентом с размером зерна –5...+2,5 мм, по окончании процесса сорбции (15–60 мин) сорбент погружается на дно водоема. В последнем случае сорбированная нефть, прочно фиксируемая в гранулах «С-верад», постепенно разлагается нефтеокисляющими бактериями, существующими в естественных условиях данной акватории [9]. Если отработанный сорбент подвергнуть термообработке, он может быть использован повторно, в ином случае сорбент утилизируется в соответствии с федеральными законами по обращению с отходами [5]. Расход «С-верад» определяется исходя из его удерживающей способности по различным видам нефтепродуктов.

Экспериментально подтверждена высокая маслонепфтеемкость «С-верад» в работе по очистке нефтезагрязненных стоков. Благодаря значительной величине активной адгезионной поверхности «С-верад» демонстрирует эффективность его использования в качестве загрузки фильтров для очистки сточных вод от эмульгированных в водных растворах органических

соединений и нефтепродуктов в широком диапазоне концентраций — от 1 до 500 мг/л, при этом степень очистки варьируется от 75 до 99 %. При исходной концентрации ~14 мг/л маслонепфтеемкость изменяется от 4,1 до 10 мг/г в зависимости от вида нефтепродуктов и гранулометрии. На рисунке представлена кривая поглощения дизельного топлива (сорт С экологического класса К4) в диапазоне исходных концентраций от 1 до 14 мг/г, в котором степень очистки варьируется от 98 ($C_{исх} = 2$ мг/л, после очистки $C_{равн} = 0.041$ мг/л) до 99 % ($C_{исх} = 14$ мг/л, после очистки $C_{равн} = 0,113$ мг/л). При снижении температуры от 40 до 5 °С степень очистки уменьшается незначительно, что позволяет применять С-верад в широком интервале температур.



Кривая поглощения дизельного топлива сорбентом «С-верад»

Свойства сорбента позволили на его основе разработать комбинированную биотехнологию с использованием его в качестве носителя для иммобилизованной микрофлоры [8]. «С-верад» обладает способностью обрастать микроорганизмами и удерживать их, что связано с химической природой носителя, его гидрофильно-гидрофобными свойствами, наличием функциональных групп. В качестве источника микрофлоры для биодеструкции нефтепродуктов использовали активный ил станций биохимической очистки городских сточных вод. Это обусловлено наличием в активных илах бактерий, эффективность которых установлена именно для биопереработки углеводородов нефтяного происхождения [9], тем более что культуры микроорганизмов, используемые в биотехнологиях, имеют относительно узкий спектр биохимических функций по сравнению с природными ассоциатами. Благодаря гетерогенности поверхностных свойств и развитой сорбционно-активной поверхности сорбента «С-верад» при разработанных условиях (рН, температура, ионный и микробиологический состав ила) наблюдается адгезия массы активного ила с образованием крупных агрегатов.

Эффективность разработанного биосорбента была протестирована в лабораторном эксперименте в контролируемых условиях (время экспонирования, pH и температура почвенного субстрата). Результаты проведенных исследований показали, что внесение в нефтезагрязненную почву биосорбента «С-верад» способствует интенсификации процессов аэрирования среды. Наблюдается адгезия массы активного ила, которая образует на поверхности носителя крупные агрегаты размером 50–200 мкм, что обеспечивает условия для более эффективной биодеструкции нефтепродуктов.

В лабораторных условиях количественная оценка биодegradации нефтепродуктов с применением сорбента «С-верад» с иммобилизованной на его поверхности микрофлорой экспериментально подтвердила эффективность предложенной биотехнологии (табл. 2). Использование комплекса методов физико-химических исследований, позволило представить последовательность окисления составляющих структурных групп нефти. Было установлено ускорение более чем в два раза процессов деструкции и полимеризации наиболее токсичных летучих фракций нефти на поверхности биосорбента вследствие микробиологического окисления, что позволяет довести уровень загрязнений почв нефтепродуктами до экологически безопасного состояния в более короткие сроки [10].

Таблица 2

Кинетика относительного изменения содержания нефтезагрязнений по групповому составу

Время контакта, сут	Общая концентрация нефти, г/кг				Соотношение фракций в остаточной нефти, %					
					метанонафтеновая		нафтено- ароматическая		смолы и асфальтены	
	МС	ДВ	«С-верад» + МС	ДВ	МС	«С-верад» + МС	МС	«С-верад» + МС	МС	«С-верад» + МС
0	200,0	–	200,0	–	64,9	64,9	19,4	19,4	15,7	15,7
1 час	119,4	58,1	134,3	26,7	67,6	68,7	18,1	14,7	14,3	18,6
15	92,0	21,7	97,2	9,4	62,4	56,4	15,7	16,3	21,8	27,3
30	79,4	6,7	63,8	1,7	51,9	42,3	13,4	18,3	34,8	39,4
60	73,3	2,5	43,4	1,2	48,0	40,4	11,6	21,6	40,4	38,0
90	67,8	2,9	28,7	0,9	40,8	35,7	10,7	23,1	48,0	41,2
120	59,2	–	16,6	–	31,6	21,4	8,2	34,4	57,6	40,4

Примечание. МС — минеральный субстрат; ДВ — дренажные воды.

Оптимальные условия технологии ремедиации нарушенных земель были реализованы на модельных площадках территории нефтебазы Лиинахамари с применением нескольких вариантов композиций сорбента с почвенным субстратом, а также биологических и химических активаторов деструкции (пероксида кальция) (табл. 3) [11]. Объемное соотношение биосорбента и почвенного субстрата, составившее 1:4, было рассчитано исходя из их дисперсных и сорбционных характеристик и уровня загрязнений. Исследования проводили в течение двух месяцев. Все результаты анализировались в сравнении с контрольным участком почвенного субстрата без применения вариантов биоремедиации. Изменение концентраций и кинетика процессов рассматривались с учетом выпадения атмосферных осадков в период наблюдений.

Различные варианты реализации биотехнологии с применением биосорбента «С-верад»

Варианты композиции	Распределение нефтепродуктов в почвах по глубине (см) после пролива, мг/г						Количество нефтезагрязнений в дренажных водах		Эффективность деградации нефтезагрязнений, %
	через 1 час			через 60 дней			мг/л	%	
	0	10	20	0	10	20			
Почвенный субстрат	8,24	6,93	6,05	1,55	1,27	0,57	5,3	66	16.02
Почвенный субстрат + сорбент	9,05	8,5	3,46	3,12	1,95	1,02	2,2	27,5	64.8
Почвенный субстрат + биосорбент	7,72	9,2	4,13	2,03	1,76	1,6	1,36	16,6	69.5
Почвенный субстрат + биосорбент + пероксид кальция	8,01	8,8	4,23	2,09	1,72	1,41	1,12	14,5	71.2
Почва — сорбент — почва	7,92	11,34	1,72	3,19	2,26	0,58	1,66	20,75	64.1
Почва — биосорбент — почва	8,53	10,42	2,13	3,68	2,52	1,94	1,05	13,1	69.3

Результаты по анализу нефтепродуктов в почве по окончании периода наблюдений показывают, что с применением сорбента «С-верад» очистка почвы от нефтезагрязнений через два месяца достигает 65–70 % (при дополнительном использовании пероксида кальция 70–72 %), что в природных условиях достигается через полтора года [12]. При этом на контрольном участке был отмечен заметный вынос нефтепродуктов со стоками. В то же время, благодаря высокой удерживающей способности на границе раздела *твердое — жидкость*, на участке с применением биосорбента предотвращалось вымывание нефтепродуктов с поступающими стоками, а наличие микроорганизмов и воды на поверхности биосорбента активировало процесс переработки нефтепродуктов. Более того, при послойном внесении биосорбента в почвенные субстраты создаются защитные горизонтальный и вертикальный барьеры распространению нефтепродуктов, что можно использовать в качестве превентивных мероприятий в местах возможных разливов нефтепродуктов и для очистки дренажных вод.

Наличие микроорганизмов на поверхности биосорбента «С-верад» позволяет его использовать при очистке сточных вод, содержащих органику животного и растительного происхождения, что значительно интенсифицирует процессы биологической переработки

загрязнений и очистки стоков. С этой целью во вторичном отстойнике очистных сооружений устанавливаются гибкие биоадгезаторы на основе «С-верада», аккумулирующие в своем объеме активную биомассу, которая разлагает трудноокисляемую органику.

Сорбент «С-верад» прошел промышленные испытания на предприятиях Санкт-Петербурга «Северный пресс» и «Балтфлот», акватории Кольского залива при разливах нефтепродуктов, а также в системах очистки на предприятиях Мурманской обл.: сточных вод алюминиевого завода (Кандалакша), рыбокоптильного завода пос. Белокаменка. Внедрение разработанного сорбента в системах очистки производственных и муниципальных хозяйственно-бытовых стоков пос. Ёна, каскада Пазских ГЭС, Северодвинской ТЭЦ, ТЭЦ № 23 и ТЭЦ № 15 г. Москвы показывают его высокую эффективность и сравнительно низкую себестоимость очистки.

На предприятии ООО «Анталья» в Тульской обл. налажено промышленное производство сорбента «С-верад» и разработаны технологические регламенты:

- по обращению с нефтесодержащими отходами производств с применением «С-верада»;
- по организации площадок временного хранения замазученного грунта с последующим обезвреживанием;
- на установку по обезвреживанию нефтешламов зачистки мазутных резервуаров и донных осадков сооружений механической очистки ливневых вод с последующей утилизацией.

Заключение

Применение разработанного в ИППЭС КНЦ РАН сорбента «С-верад» позволяет эффективно решать ряд экологических задач, связанных с удалением нефтепродуктов и труднорастворимой органики, как в аварийных ситуациях, так и при ускорении санации локальной нефтезагрязненной территории, включая почвы, сточные воды и хозяйственно-бытовые стоки. Применение в качестве источника микрофлоры активного ила для иммобилизации на поверхности сорбента обеспечивает утилизацию нефтешламов до экологически безопасного состояния, делает его конкурентоспособным с известными материалами в биоремедиации природных сред и определяет низкие затраты на его производство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сироткина Е. Е., Новоселова Л. Ю. Материалы для адсорбционной очистки воды от нефти и нефтепродуктов // Химия в интересах устойчивого развития, 2005. Вып. 13. С. 359–377.
2. Привалова Н. М., Двадненко М. В., Некрасова А. А. Очистка нефтесодержащих сточных вод с помощью природных и искусственных сорбентов // Науч. журнал Кубан. ГАУ. 2015. № 13 (09).
3. Peculiarity of Water Purifying from Oil Products with Make Use of Oil Sorbents, Filtering Materials and Active Coals / V. Veprikova [et al.] // Chemistry / Siberian Federal University. 2010. No. 3. P. 285–304.
4. Зосин А. П., Приймак Т. И., Кошкина Л. Б. Влияние катионов модификаторов на каталитические свойства органо-минеральных материалов с закрепленными металлокомплексами на основе лигносульфонатов // XVI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. М., 1998. С. 119–120.
5. «С-верад» — адсорбент для сбора нефтепродуктов, органических и токсичных жидкостей / А. П. Зосин [и др.] // Тезисы докладов конференции «Губкинские чтения» / РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина. 2001. С. 123–125.
6. Углеродминеральные адсорбенты на основе слоистых алюмосиликатов для иммобилизации бактериальных клеток и ремедиации загрязненных почв / А. П. Зосин [и др.] / ИХТРЭМС КНЦ РАН. Апатиты, 1996. 100 с.
7. Зосин А. П., Приймак Т. И., Кошкина Л. Б. Биоадсорбенты на основе углеродминеральных материалов для биохимической очистки сточных вод / ИХТРЭМС КНЦ РАН. Апатиты, 2000. С. 142–149.
8. Маркарова М. Ю., Емельянова Л. Г., Щемелинина Т. Н. Особенности деструкции нефтяных соединений некоторыми природными нефтеокисляющими бактериями // Новые технологии для очистки нефтезагрязненных вод, почв, переработки и утилизации нефтепродуктов. М., 2001. С. 118–121.
9. Ягафарова Г. Г. Экологическая биотехнология в нефтегазодобывающей и нефтеперерабатывающей

промышленности. Уфа, 2001. С. 93. **10.** Интенсификация процессов биodeградации нефтепродуктов, аккумулированных на поверхности минеральных субстратов / А. П. Зосин [и др.] // Экологическая химия. 2004. Вып. 2, т. 13. С. 125–131. **11.** Зосин А. П., Приймак Т. И., Сулименко Л. П. Комплексная биотехнология восстановления нефтезагрязненных земель с использованием биосорбента «С-верад» / ИППЭС КНЦ РАН. Апатиты, 2008. С. 109–110. **12.** Пиковский Ю. И. Трансформация техногенных потоков нефти в почвенных экосистемах. М., 1988. С. 7–41.

Сведения об авторах

Сулименко Людмила Петровна — старший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

E-mail: gonor@list.ru

Кошкина Людмила Борисовна — старший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

E-mail: koschkina@yandex.ru

Маслобоев Владимир Алексеевич — доктор технических наук, профессор, директор Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

E-mail: masloboev@ksc.ru

Author Affiliation

Lyudmila P. Sulimenko — Senior Researcher of the Institute of Industrial North Ecology Problems of the KSC of the RAS

E-mail: gonor@list.ru

Lyudmila B. Koshkina — Senior Researcher of the Institute of Industrial North Ecology Problems of the KSC of the RAS

E-mail: koschkina@yandex.ru

Vladimir A. Masloboev — Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Industrial North Ecology Problems of the KSC of the RAS

E-mail: masloboev@ksc.ru

Библиографическое описание статьи

Сулименко, Л. П. Практические аспекты использования сорбентов для санации локальных нефтезагрязненных северных территорий / *Л. П. Сулименко, Л. Б. Кошкина, В. А. Маслобоев* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 1 (9). — С. 116–123.

Reference

Sulimenko Lyudmila P., Koshkina Lyudmila B., Masloboev Vladimir A. Practical Aspects of the Use of Local Sorbents for the Renovation of Oil-Contaminated Areas. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1 (9), pp. 116–123 (In Russ.).

УДК 556.565:551.34

ФОРМИРОВАНИЕ ГЛУБИН ПРОМЕРЗАНИЯ БОЛОТ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

И. Л. Калюжный

ФГБУ Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург

Аннотация

Многолетние наблюдения на сети болотных станций Росгидромета позволили определить глубины промерзания болот на территории Кольского п-ова, а также факторы, обуславливающие процесс их промерзания. Установлено, что глубина промерзания зависит от температуры воздуха и теплоизолирующих свойств снежного покрова. Температура воздуха оказывает определяющее влияние на начальном этапе промерзания. С увеличением высоты снега свыше 10–15 см уменьшается влияние температуры воздуха на интенсивность промерзания.

Средние многолетние глубины промерзания на Пулозерском болоте достигают 58 см; на Краснощельском — 51 см. Южные болота, Алакурттинское и Канозерское, промерзают меньше — 45 и 36 см. Наибольшие глубины промерзания достигают 95–98 см. При глубине промерзания до 20–30 см коэффициент вариации равен 0,3–0,4 и далее уменьшается до 0,1 с увеличением глубины промерзания до 60 см и более.

Определен, начиная с 1977–1978 гг., значимый тренд уменьшения глубины промерзания под влиянием климатических изменений.

Ключевые слова:

промерзание болот, болота Кольского п-ова, обуславливающие факторы, глубина и масса промерзания, пространственная и временная изменчивость.

FORMING OF FREEZING DEPTH FOR BOGS OF THE KOLA PENINSULA

Igor L. Kalyuzhny

State Hydrological Institute, St. Petersburg

Abstract

Observations from specialized RosGidroMet station network, performing by common method during a long-time period, allowed to determine characteristics of depths of bog freezing at the Kola Peninsula territory. It was fixed that air temperature and snow cover thickness are main factors, affecting process of bog freezing. It has been shown that effect of air temperature is the main forcing factor at the early stage when snow cover thickness is small. In autumn season at snow thickness less than 10 cm freezing intensity is equal to 0,5–0,8 cm per day (for hollow — 0,4–0,6 cm per day). Freezing intensity decreases up to 0,1–0,3 cm per day when snow thickness increases up to 20–30 cm and more. Norm of freezing depth for the Pulozero bog amounts up 58 cm, for Krasnoschelskoe bog — 51 cm. Maximal depth of freezing is equal to 95–98 cm.

At depth of freezing less than 20–30 cm, variability index of depth freezing (for single bog) is equal to 0.3–0.4. Under the depth increase until 60 cm and more, this index decrease up to 0,1. It has been determined that downward trend of depth freezing under the climate change effect is significant at autocorrelation coefficient of 0,56.

It has been fixed that sufficiently close relationship exists between mass and depth of freezing, and correlation coefficient amounts to 0.95–0.98. Coefficient value is due to a high content of capillary water within an active layer. High water content and undecomposed plant deads within a frozen layer determine high strength of this layer and remarkably increase its loading capacity.

Keywords:

bog freezing, bogs of the Kola Peninsula, affecting factors, depth and mass of freezing, spatial and temporal variability.



Введение

Использование болотных массивов как несущего основания для линейных сооружений в условиях севера европейской территории России требует сведений о глубинах промерзания и оттаивания торфяной залежи, особенно при современных климатических изменениях. Процесс промерзания болотных массивов есть результат сложного взаимодействия ряда внешних и внутренних факторов. Внешние факторы (в первую очередь, температура воздуха и снежный покров) являются определяющими в процессе промерзания болот, внутренние (влажность торфяной залежи и ее теплофизические свойства) — определенным образом влияют на интенсивность промерзания залежи. Контактной зоной теплового взаимодействия является поверхность болота, а областью фазовых превращений влаги — промерзающий (промерзший) слой болота, нижняя граница которого определяет глубину промерзания.

При появлении мерзлого слоя на поверхности болота изменяются все его водно-физические, тепловые и механические свойства. Именно последние определяют его несущую способность и, как следствие, проходимость транспортными средствами. Пространственные и временные характеристики глубин промерзания болот ЕТР изучались в 1941–1943 гг. Б. В. Проскураковым применительно к требованиям ведения боевых действий на территории СССР, в послевоенные годы — В. В. Романовым [1] и С. А. Чечкиным (1970) [2]. Однако достоверные сведения о глубинах промерзания болот Кольского п-ова и их формировании при климатических изменениях является слабо изученной областью гидрометеорологии. Цель настоящей работы — дать объективную оценку глубин промерзания болот Кольского п-ова.

Краткое описание объектов исследования

При выполнении настоящей работы были использованы результаты наблюдений за показателями промерзания болот на специализированной станции и постах Мурманского УГМС:

- в Кольской провинции тундры, лесотундры и крупнобугристых болот на болотном массиве Краснощельское, болотный пост Краснощелье;
- в Финско-Кольской провинции северной тайги и лапландских аапа на мезоолиготрофных Пулозерском и Канозерском болотах, болотная станция Пулозерская и пост Канозеро;
- в Карело-Финской провинции северной тайги и аапа-болот, болото Алакуртинское, болотный пост Алакуртти.

Пункты наблюдений над промерзанием болот приведены на карте-схеме (рис. 1).

Пулозерское болото расположено среди холмистой местности в бассейне р. Кола, вытянуто в меридиональном направлении: ширина 4–5 км при длине около 10 км. Болото принадлежит к периферическому мезоолиготрофному типу развития и имеет вогнутую поверхность. Наиболее пониженными участками являются его центральные части. Северная и южная части болота покрыты смешанным лесом, центральная — почти безлесна, встречаются отдельные сосны высотой до 3–6 м. Более детальное описание Пулозерского болота приведено в работе И. Л. Калюжного [3].



Рис. 1. Карта-схема расположения пунктов наблюдений за промерзанием болот на Кольском п-ове:
 1 — болотная станция Пулозеро; 2 — болотные посты; 3 — Кольская провинция тундры, лесотундры и крупнобугристых болот; 4 — Фенноскандийская провинция березовой лесотундры и крупнобугристых болот; 5 — Финско-Кольская провинция северной тайги и лапландских аапа; 6 — Карело-Финская провинция северной тайги и аапа-болот

Канозерское болото расположено в долине р. Муна, на ее правом берегу. Окружающая местность холмистая, покрытая лесом из ели и березы. Болото представляет собой массив длиной 3,5 км и шириной до 2,5 км, разделенный вдоль ручьем Ахма, который его дренирует. Болото принадлежит к группе котловинного залегания периферически-олиготрофного хода развития.

На болоте распространены следующие микроландшафты: сфагново-кустарничковый, облесенный сосной; грядово-мочажинный; осоково-сфагновый.

Сфагново-кустарничковый, облесенный сосной микроландшафт встречается по всему болоту и занимает до 60 % его площади. Растительность — сфагновые мхи, голубика, брусника, багульник, подбел, сосна и береза.

Сфагново-кустарничковый (без облесения) приурочен к центральной части массива. Растительность, вдоль ручья Ахма представлена тростником, хвощем, осокой, таволгой.

Грядово-мочажинный комплекс развит в юго-восточной части болота и занимает до 15 % площади. Гряды сфагново-кустарничковые, мочажины — с открытой водной поверхностью и редкими кочками из пушицы, местами с обнаженным торфом.

Осоково-сфагновый микроландшафт расположен в западной и юго-восточной частях болота. Растительный покров состоит из сфагновых мхов, осоки, пушицы, вахты и кустарничков — голубики, вереска, подбела, багульника, морошки и клюквы.

Залежь в основном сложена сфагновыми торфами. Глубина залежи в центральной и западной части болота — 1,3 м, в восточной — 2,0 м и более.

Краснощельское болото расположено в верхней части бассейна р. Поной, в вытянутой ложбине среди холмистой местности. Ширина болота 1–2 км при длине 7,0 км. Болото принадлежит к периферически-олиготрофному ходу развития, типа лапландских аапа. Поверхность его вогнута.

Наиболее распространенным является грядово-мочажинный комплекс, который занимает до 60 % площади. Гряды покрыты сфагновыми мхами и кладонией, а также кустарничками из голубики, подбела, багульника и морошки. Мочажины поросли осокой, пухоносом и вахтой. Травяной микроландшафт занимает северную часть болота. Его растительность представлена осокой и пушицей. Сфагново-кустарничковым микроландшафтом занята южная часть массива. Моховой покров составляют сфагновые мхи, кустарничковый — голубика, клюква и подбел.

Торфяная залежь в основном состоит из гипновых и древесно-гипновых торфов. В северной части болота встречается пушицево-сфагновый торф, в южной — фускум-торф.

Дренирует болото ручей Холодный, который вытекает из Кальваньозера.

Алакурттинское болото расположено в долине р. Тунтса-йоки, на ее правом берегу между сопками. Болото принадлежит к периферически-олиготрофному ходу развития. Поверхность его вогнутая, с наиболее пониженными участками в центральной части.

Наиболее распространенным микроландшафтом является сфагново-кустарничково-пушицевый с редким облесением сосной и березой. Среди этого микроландшафта встречаются отдельные мочажины с редкими кочками диаметром и высотой до 0,5 м, покрытыми пушицей и единичными соснами. Гряды и кочки составляют до 30 % площади. В центральной части массива расположена вытянутая с севера на юг, проточная, шириной 80–100 м, осоково-вахтовая топь с редкими грядами и кочками, покрытыми сфагновыми мхами. К востоку от топи, следуя одна за другой, расположены шесть мочажин, соединенных между собой небольшими ручьями. На мочажинах наблюдается оголенный торф. Сфагново-осоковый микроландшафт, с грядами и кочками, покрытыми сфагновыми мхами, кустарничками (вереском, подбелом, карликовой березкой, морошкой), расположен к западу от проточной топи. Он также вытянут с севера на юг.

Торфяная залежь состоит из сфагново-осоковых и сфагново-древесных торфов. Ее глубина не превышает 1,5 м, степень разложения торфа колеблется от 10 до 40 %.

Методика производства наблюдений за промерзанием болот

В основу производства наблюдения за характеристиками промерзания болота положен метод шурфования, при котором посредством пешни в мерзлой залежи прорубают шурф и мерной рейкой определяют нижнюю и верхнюю границы промерзшего слоя, а также «массу промерзания». Под массой промерзания понимается количество льда, заключенного в столбике промерзшего слоя площадью 1 см^2 и длиной от поверхности болота до нижней границы промерзшего слоя. Она выражается в сантиметрах слоя воды. Массу промерзания определяют визуальным путем. Методика определения характеристик промерзания рассмотрена в работе В. В. Романова [1].

В каждом пункте наблюдений — на площадке с ненарушенным снежным покровом определяют среднее значение высоты снега. Во все годы наблюдения за промерзанием болот проводились по единой методике [4], включая последующие издания.

Результаты наблюдений за глубиной промерзания болот

Многолетние наблюдения на специализированной сети болотных станций и постов Росгидромета (ранее Гидрометеослужбы СССР) позволили установить среднеголетние характеристики глубины промерзания болот на территории Кольского п-ова, а также факторы, обуславливающие процесс промерзания. Главными факторами, определяющими интенсивность и глубину промерзания болот, являются температура воздуха, мощность снежного покрова и степень обводненности микроландшафта.

Промерзание болот в северной части Финско-Кольской провинции северной тайги и лапландских аапа начинается в конце сентября и продолжается до первой половины апреля. В Карело-Финской провинции северной тайги и аапа-болот промерзание начинается во второй-третьей декадах октября, завершается в конце марта. Полное оттаивание мерзлого слоя происходит в конце июля. В некоторые годы небольшая прослойка мерзлого слоя сохраняется весь теплый период года. Непродолжительные оттепели не оказывают значительного влияния на формирования мерзлого слоя.

На рис. 2 приведена взаимосвязь глубины промерзания болота и суммы среднесуточных температур воздуха. Сезонная динамика промерзания (в зависимости от суммы суточных отрицательных температур воздуха) характеризуется большой интенсивностью в осенний период и замедленной — в зимний. Переломный момент в интенсивности промерзания наступает при высоте снежного покрова, равной 10–15 см.

Интенсивность промерзания гряд грядово-мочажинного комплекса при высоте снега до 10 см в среднем в осенний период составляет 0,5–0,8 см/сут, мочажин — 0,4–0,6 см/сут. С увеличением высоты снежного покрова свыше 20–30 см интенсивность промерзания существенно снижается до 0,1–0,3 см/сут. Анализ этих зависимостей показывает, что в условиях Кольского п-ова за осенний период образуется мерзлый слой, толщина которого в среднем составляет 30–50 % от общей глубины промерзания.

Если зависимость $h = f[\sum(-T)]$ представить таким образом: $h = f[\sqrt{\sum(-T)}]$, она принимает вид прямой линии с постоянным угловым коэффициентом. Однако угловой коэффициент не зависит от типа микроландшафта и изменяется от года к году.

Анализ, представленный на (рис. 3), показывает: при относительно небольшой толщине снежного покрова (в пределах 20–30 см), что наблюдалось в 1959, 1960, 1967 и 1972 гг., при абсолютной сумме среднемесячных температур воздуха за зимний сезон (с ноября по март) меньших, чем их среднее значение ($-53,8^{\circ}\text{C}$), глубины промерзания болота достигают наибольших величин (соответственно 82, 77, 84 и 81 см); при увеличении толщины снега и температурах воздуха, близких к средним, глубина промерзания уменьшается.

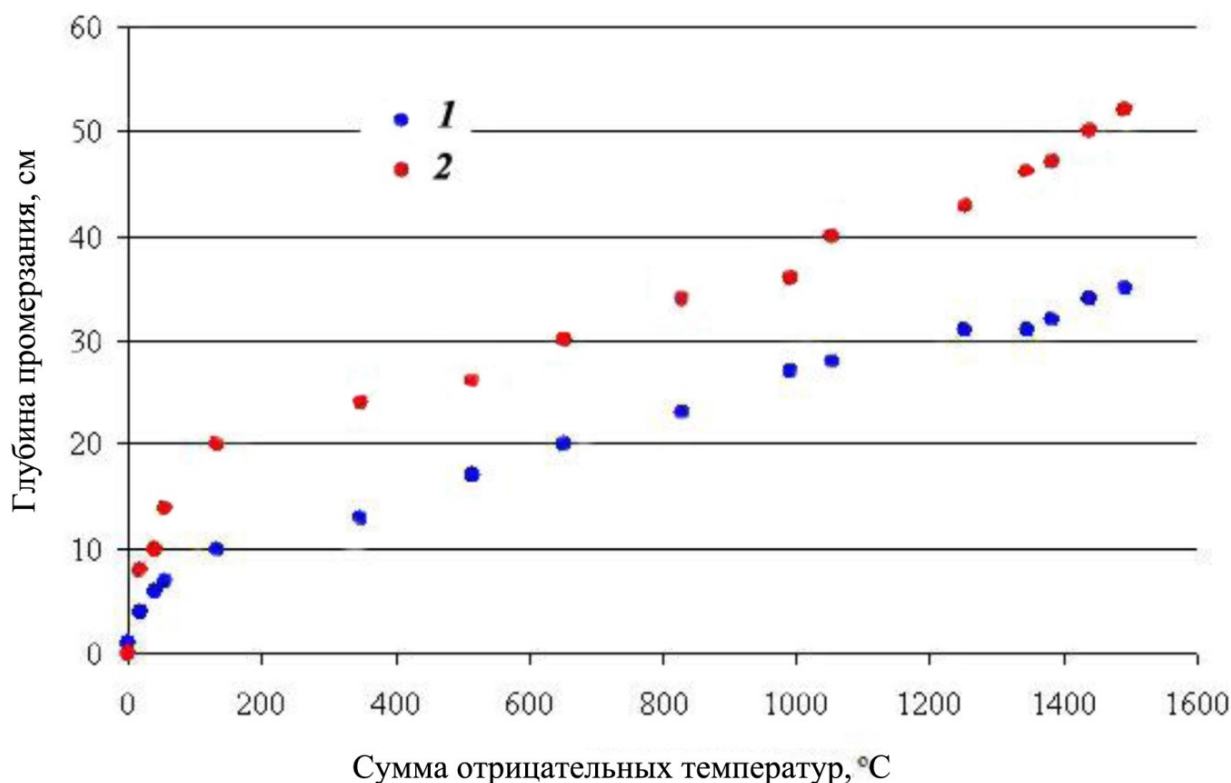


Рис. 2. Зависимость глубины промерзания от суммы отрицательных температур воздуха на Пулозерском болоте зимой 1983–1984 гг.:

1 — мочажина кустарничково-лишайникового микроландшафта, 2 — гряда грядово-мочажинного комплекса

Зависимость глубины промерзания (h) в кустарничково-лишайниковом микроландшафте Пулозерского болота от высоты снежного покрова (H) на дату наибольшей глубины промерзания, когда и мощность снежного покрова наибольшая за зиму, имеет вид: $h = -0,453H + 67,7$ при коэффициенте корреляции $R = 0,525$. Эта же зависимость от температуры воздуха зимнего периода крайне незначительна и имеет коэффициент корреляции $R = 0,026$.

Согласно результатам наблюдений, при средней высоте снега в 44 см на образование 1,0 см мерзлого слоя необходима сумма суточных отрицательных температур воздуха около 30°C . Она (сумма температур) изменяется следующим образом: при высоте снега до 20 см необходимо $15,3^{\circ}\text{C}$, при высоте 77 см — 61°C . Фактор обводненности микроландшафта существенной роли не играет, так как осенние осадки поднимают уровень болотных вод практически к его поверхности, тогда во все годы наблюдений обводненность в предзимний период становится величиной постоянной.

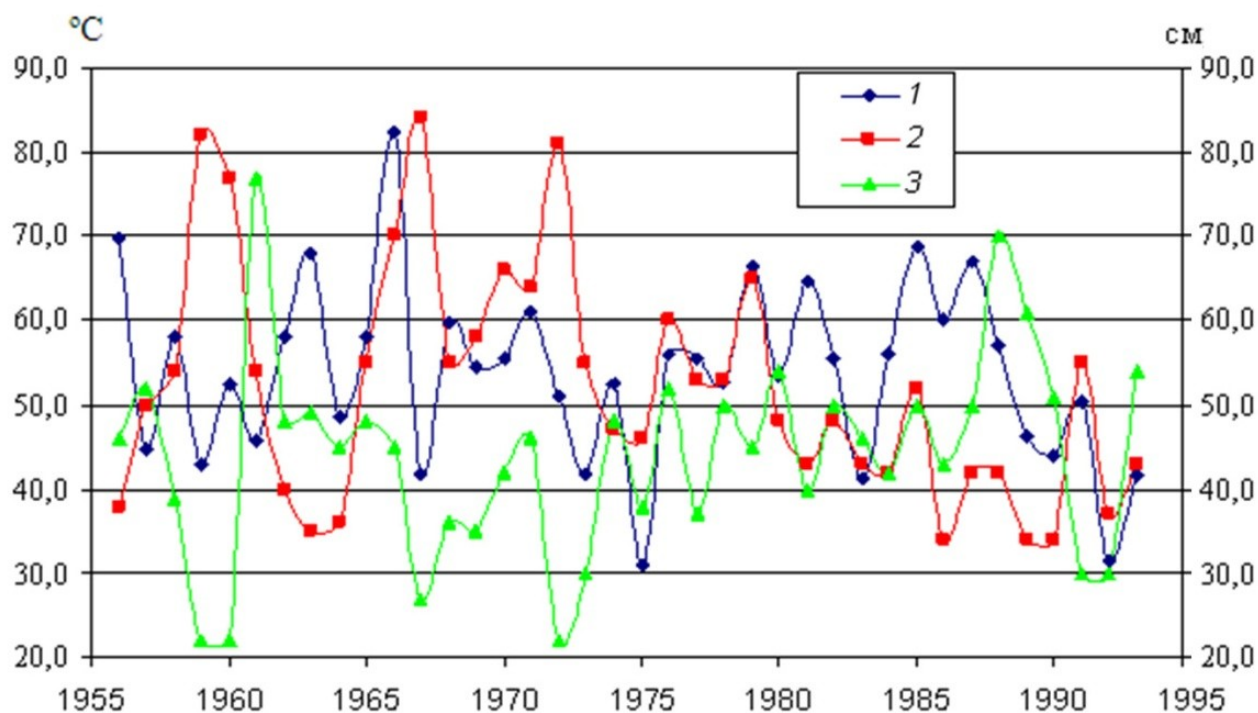


Рис. 3. Динамика глубин промерзания кустарничково-лишайникового микроландшафта и факторов его обуславливающих:

1 — абсолютная сумма отрицательных температур воздуха; 2 — глубина промерзания; 3 — толщина снега

В табл. 1 приведены результаты наблюдений за период с 1956 по 1993 гг. Наибольшие из средних значений глубины промерзания наблюдаются на болотном массиве Пулозерское, где они в среднем достигают 58 см, несколько меньше промерзает Краснощельское болото — 51 см. Средние значения глубины промерзания болот, расположенных значительно южнее Пулозерского, Алакурттинского и Канозерского, существенно меньше — 45 и 36 см соответственно. Однако аномально большие глубины, свыше 80–90 см, наблюдаются на всех болотах, исключая Канозерское, где они не превышают 54 см.

Таблица 1

Статистические характеристики промерзания болот Кольского п-ова

Болото, микроландшафт, форма микро рельефа	Глубина промерзания, см				Масса промерзания, см		
	средняя	max	min	C_v	средняя	max	min
1	2	3	4	5	6	7	8
1956–1993 гг. Пулозерское							
Кустарничково-лишайниковый понижение	45	60	32	0,16	42	56	29
повышение	66	90	48	0,15	63	85	45
Грядово-мочажинный комплекс							
гряда	67	84	44	0,16	59	75	41
мочажина	52	84	34	0,27	50	84	32

1	2	3	4	5	6	7	8
1966–1993 гг. Алакуртгинское							
Сфагново-пушицево-кустарничковый повышение	48	97	27	0,30	45	91	25
мочажина	42	96	18	0,37	40	91	16
Сфагново-кустарничково- пушицевый, облесенный сосной, березой							
повышение	48	92	33	0,29	45	86	31
понижение	42	90	21	0,33	39	85	20
1962–1993 гг. Краснощельское							
Осоково-пушицевый							
повышение	57	84	43	*	24	46	16
понижение	48	69	32	0,20	35	56	23
Грядово-мочажинный комплекс							
мочажина	49	70	30	0,21	35	56	22
гряда	53	87	34	0,22	20	32	13
1961–1987 гг. Канозерское							
Осоково-сфагновый							
повышение	37	49	22	0,21	26	35	16
понижение	35	48	20	0,23	25	35	14
Грядово-мочажинный комплекс							
гряда	34	49	18	0,22	26	35	13
мочажина	36	54	18	0,24	27	54	13

Примечание. C_v — коэффициент вариации, в долях от единицы.

* C_v не определялся.

В пределах болота средние значения глубины промерзания болотных микроландшафтов (табл. 1) в целом различаются незначительно, а с учетом формы микрорельефа их отличие не выходит за пределы 2–7 см. По-видимому, это обусловлено минимальными различиями в характеристиках водного режима этих микроландшафтов.

Анализ временных рядов наблюдений за промерзанием болот Кольского п-ова (рис. 4) показывает, что в большинстве случаев наблюдается совпадение по фазе, но не по величине глубины промерзания. Так, в пределах Финско-Кольской провинции северной тайги и лапландских аапа коэффициенты корреляции между смежными рядами глубины промерзания мочажин грядово-мочажинных комплексов Пулозерского и Канозерского болот не превышают 0,44, еще более слабо эта связь выражена между значениями глубины промерзания болот других болотных провинций.

Временная изменчивость глубины промерзания болот Кольского п-ова определяется коэффициентом вариации (C_v , табл. 1), который служит мерой оценки колебаний наибольших годовых величин относительно его нормы. Для болот полуострова он изменяется в диапазоне значений от 0,15 до 0,37. Таким образом, временная изменчивость глубин промерзания относительно небольшая. В пределах болота она в основном зависит от высоты снежного покрова, который

обусловлен вариацией высот микрорельефа и произрастающей растительностью. Отсюда, при относительно слабо развитом микрорельефе, где разность высот его элементов в пределах мочажин или гряд грядово-мочажинного комплекса не превышает 10 см, коэффициент вариации временного ряда будет небольшим — 0,15–0,16, что и наблюдается на Пулозерском болоте. При развитом микрорельефе на Алакурттинском болоте в сфагново-пушицево-кустарничковом микроландшафте, где средняя плоскость повышений над плоскостью понижений больше на 29–30 см, коэффициент вариации возрастает до 0,33–0,37.

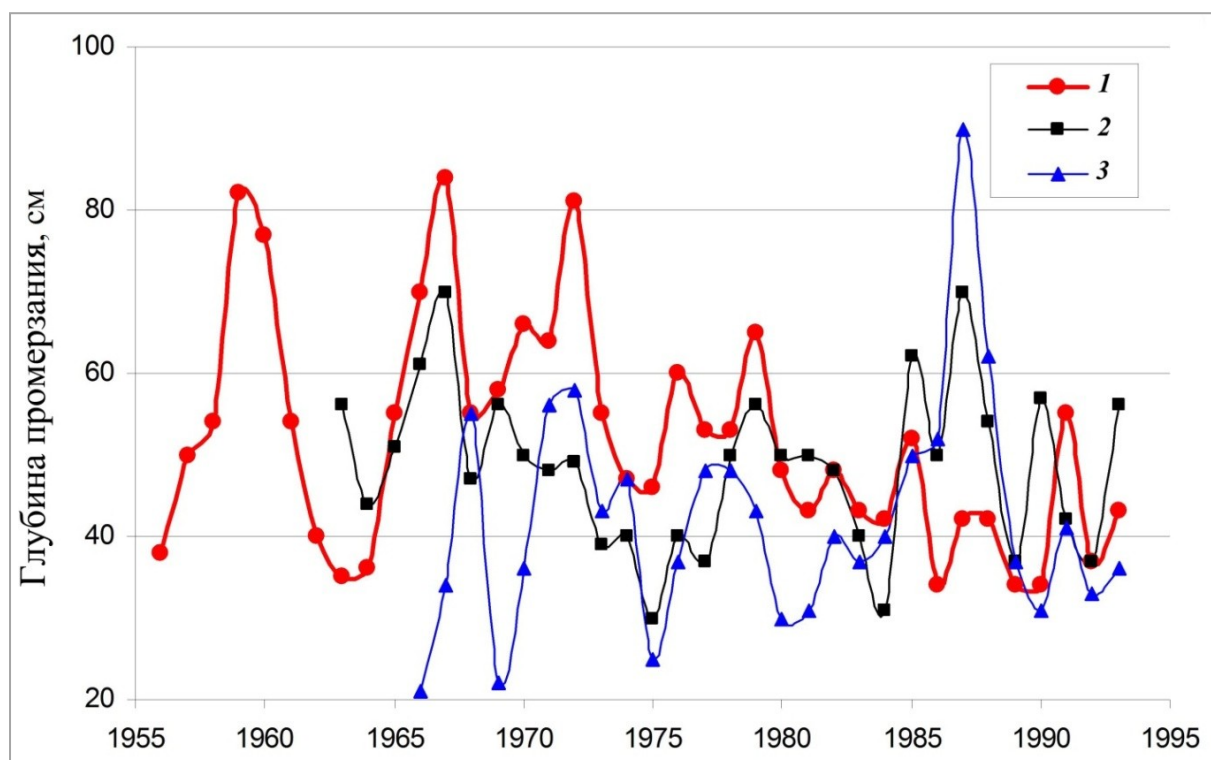


Рис. 4. Временные ряды глубины промерзания некоторых микроландшафтов болот Кольского п-ова:
 1 — Пулозерское болото, грядово-мочажинный комплекс, мочажина; 2 — Краснощельское болото, грядово-мочажинный комплекс, мочажина; 3 — Алакурттинское болото, сфагново-пушицево-кустарничковый микроландшафт, понижения

В работе И. Л. Калюжного и К. Д. Романюк показано, что болота северо-запада и севера России начиная с 1979–1980 гг. изменяют свои гидрометеорологические характеристики под влиянием изменения климатических факторов [5]. Анализ временных рядов наблюдений промерзания болот Кольского п-ова показывает, что с 1977–1978 гг. аналогичные изменения наблюдаются и на этих болотах. Наиболее отчетливо это проявляется на примере промерзания мочажин грядово-мочажинного комплекса Пулозерского болота. Временной ряд промерзания мочажин характерен тем, что влияние степени их обводненности на изменчивость глубины промерзания не оказывает влияния: мочажина имеет открытую водную поверхность и, следовательно, постоянное увлажнение. Глубина промерзания мочажин зависит только от климатических факторов — температуры воздуха и высоты снежного покрова. Временной ход глубин промерзания мочажины (ряд 1 на рис. 4) однозначно показывает, что с 1977–1978 гг.

хорошо просматривается тренд на уменьшение глубины промерзания. В пределах периода 1977–1993 гг. его можно выразить линейным уравнением вида $h = -0,9461\tau + 1923$, где h — глубина промерзания, см; τ — год ряда. Коэффициент корреляции R равен 0,56.

Оценка значимости линейного тренда определялась по методике [6]. При уровне значимости 5 %, что соответствует удвоенной случайной средней квадратической ошибке σ ($\sigma = 0,17$), величина 2σ (0,34) меньше коэффициента корреляции, на основании чего признается неоднородность рядов наибольших глубин промерзания. Таким образом, тренд глубин промерзания болота устанавливается значимым с 95 %-м уровнем надежности.

Наименьшие глубины промерзания наблюдаются на Канозерском болотном массиве, где средние многолетние значения не выше 37 см, а наблюдаемые наименьшие значения в грядово-мочажинном комплексе не превышают 18 см. На Пулозерском болотном массиве средние многолетние значения не превышают 58 см, а наблюдаемые наименьшие в грядово-мочажинном комплексе 34–44 см. При близких характеристиках температурного режима на этих двух болотных массивах столь существенное различие в глубинах промерзания объясняется существенным различием в высотах снежного покрова. На Пулозерском болотном массиве средние из наибольших высот снежного покрова соответствуют пределу 44–51 см, на Канозерском — 64–67 см. Отсюда и глубины промерзания на Канозерском болоте существенно меньше.

Наибольшие глубины промерзания на болотах Кольского п-ова приближаются к 95–97 см. В зиму 1986–1987 гг. наибольшая глубина промерзания наблюдалась на Алакурттинском болоте и была равна 97 см. Начало промерзания на этом болоте, практически при отсутствии снежного покрова и среднесуточной температуре воздуха $-6,2$ °С, произошло 5 ноября 1986 г., его глубина была равна 4 см. До 25 декабря высота снега не превосходила 5–9 см, а температура понижалась до $-34,0\dots-36,9$ °С. Глубина промерзания за этот период достигла 55–59 см. Далее до конца января толщина снежного покрова возросла до 17 см, а глубина промерзания, при несколько повышенных температурах воздуха, достигла 80–82 см. Интенсивные осадки 20 февраля увеличили толщину снега до 44 см, при этом нарастание глубины промерзания при температуре воздуха до $-27,8$ °С замедлилось, и 28 февраля глубина промерзания составляла 84 см. Далее проникновение волны холода в более глубокие горизонты при одновременном повышении температуры воздуха до $-3,4\dots-8,2$ °С и увеличении снежного покрова до 55–62 см не препятствовало промерзанию залежи до глубины 96–97 см. Последнее наблюдалось 30 апреля 1987 г.

В первых числах мая снежный покров сошел, началось оттаивание поверхности болота, Одновременно происходит оттаивание со стороны нижней границы мерзлого слоя под влиянием теплового потока, идущего с глубинных слоев торфяной залежи. 10 мая толщина верхнего талого слоя составила всего лишь 5 см; 31 мая верхний талый слой составил 19–20 см, нижняя граница мерзлого слоя была на глубине 72–77 см. Оттаивание верхнего слоя происходило до 31 августа, когда остаточный мерзлый слой наблюдался на глубине 79–89 см, а новое промерзание началось 12 сентября 1987 г. В целом, столь большие глубины промерзания представляют собой аномальное явление.

В пределах болотного массива изменчивость глубин промерзания обусловлена строением микрорельефа болотных микроландшафтов. Собственно микрорельеф и растительность на нем определяют пространственную изменчивость глубин промерзания. Промерзание всегда больше на повышенных элементах микрорельефа. Так, на грядах грядово-мочажинного комплекса (болото Пулозерское) оно в среднем на 15 см выше, чем на мочажинах. В кустарничково-

лишайниковом микроландшафте повышения промерзают на 21 см больше, чем понижения. Аналогичные закономерности наблюдаются и на других болотах. Объясняется это тем, что на более высоких элементах микрорельефа меньшая толщина снежного покрова (т. е. теплоизолирующие свойства понижены) по отношению к мочажине. К тому же поверхность мочажины всегда ниже на 15–30 см по отношению к поверхности гряды. Вторым фактором, обуславливающим эту разность, является теплопроводность гряд и мочажин. Теплопроводность мерзлого деятельного слоя гряд всегда больше, чем мочажин, так как они всегда менее увлажнены, чем мочажины. На мочажинах наблюдается в предзимний период практически полное насыщение их влагой или даже открытая водная поверхность. Вне зависимости от типа микроландшафта в пределах одного болота, средние глубины промерзания пониженных элементов микрорельефа практически всегда близки, что мы и наблюдаем на примере Краснощельского болота: средняя глубина промерзания мочажин грядово-мочажинного комплекса — 49 см, понижения осоково-пушицевого микроландшафта — 48 см (табл. 1).

Факторы, влияющие на глубину промерзания, — растительный покров, степень увлажнения, микрорельеф, неравномерность залегания снежного покрова и др. — обуславливают и пространственную изменчивость глубин промерзания в пределах болотного массива. Для ее оценки на Пулозерском болоте проводились измерения наибольших глубин промерзания в господствующих микроландшафтах с учетом форм их микрорельефа. Изменение коэффициента вариации C_v от глубины промерзания h (см) и зависимость (рис. 5) определяются выражением $C_v = 4252,7h^{-2,599}$ при $R = 0,83$.

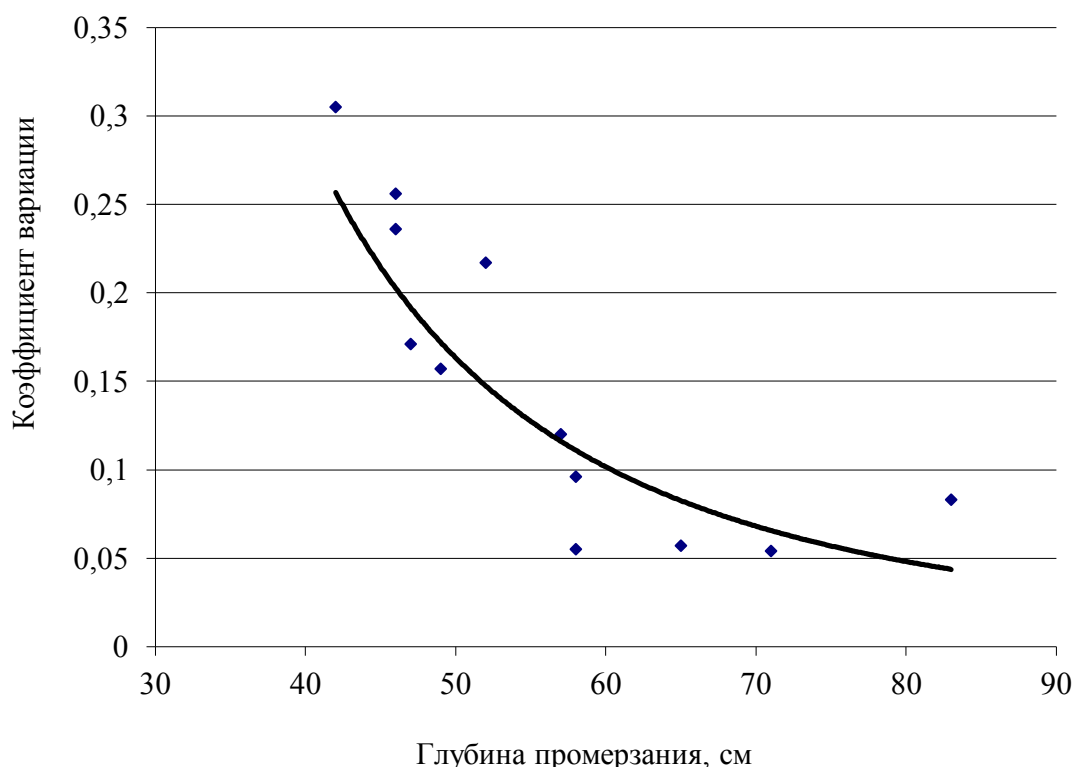


Рис. 5. Зависимость коэффициента вариации глубины промерзания Пулозерского болотного массива от наибольших глубин промерзания

Анализ полученной зависимости показывает, что пространственная изменчивость глубин промерзания (в пределах болотного массива) уменьшается от больших значений C_v — при глубинах промерзания до 40 см до величин менее 0,10 — при глубинах промерзания свыше 60 см. Наибольшая пространственная изменчивость наблюдается в начальный период промерзания и далее уменьшается по мере увеличения глубины промерзания.

Постоянство степени увлажнения пониженных или повышенных элементов микрорельефа (которые ежегодно в предзимний период сохраняют практически постоянную степень увлажнения) обуславливает и небольшую временную изменчивость рядов наблюдений за их промерзанием, так как в этом случае фактор степени увлажнения практически постоянный. Коэффициент вариации членов таких рядов становится незначительным (0,15–0,16), а внутрирядная их связь достаточно тесная. Так, в рядах промерзания мочажин грядово-мочажинного комплекса коэффициент автокорреляции достигает 0,51. При коэффициенте вариации глубин промерзания на Алакургтинском болоте, равном 0,33–0,37, коэффициент автокорреляции ряда соответственно равен 0,35–0,39. Наибольшую автокорреляцию имеет ряд наблюдений глубин промерзания мочажин грядово-мочажинного комплекса Пулозерского болота с коэффициентом автокорреляции 0,53.

Между массой и глубиной промерзания существует зависимость, теснота которой обусловлена высоким содержанием капиллярной влаги в деятельном слое торфяной залежи. Содержание этой влаги формируется посредством капиллярных сил в весьма пористой структуре слаборазложившегося торфа, что не позволяет накапливаться избыткам влаги при выпадении осадков выше равновесного содержания. Отсюда теснота связи между глубиной и массой промерзания, определяемая коэффициентом корреляции, приближается к единице. Пример зависимости массы промерзания от глубины промерзания мочажины грядово-мочажинного комплекса Пулозерского болота приведен на рис. 6. Согласно рис. 6 и соответствующему уравнению регрессии, для мочажины грядово-мочажинного комплекса этого болота при глубине промерзания 80 см масса промерзания составляет 78,9 см, а сухое вещество торфа в промерзшей мочажине занимает 1,3 % мерзлого слоя. Сухое вещество торфа в промерзшем слое гряды занимает 11,1 %. В табл. 2 приведены уравнения регрессии этой зависимости для отдельных микроландшафтов болот Финско-Кольской провинции северной тайги.

Таблица 2

Зависимость массы промерзания (M , см) от глубины промерзания (h , см)
болот Кольского полуострова

Болото, микроландшафт, форма микрорельефа	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
1	2	3
Пулозерское		
Кустарничково-лишайниковый понижение	$M = 0,946h - 0,281$	0,99
повышение	$M = 0,939h - 0,04$	0,99
Грядово-мочажинный комплекс		
гряда	$M = 0,859h + 2,43$	0,94
мочажина	$M = 1,020h - 2,68$	0,99

1	2	3
Алакургтинское сфагново-пушицево-кустарничковый повышение	$M = 0,940h - 0,01$	0,99
мочажина	$M = 0,912h + 2,04$	0,98
Сфагново-кустарничково-пушицевый, облесенный сосной и березой повышение	$M = 0,944h - 0,28$	0,98
понижение	$M = 0,925h + 0,66$	0,98
Краснощельское Осоково-пушицевый повышение	$M = 0,691h - 15,6$	0,96
понижение	$M = 0,760h - 1,65$	0,99
Грядово-мочажинный комплекс мочажина	$M = 0,761h - 1,79$	0,99
гряда	$M = 0,371h - 0,08$	0,99
Канозерское Осоково-сфагновый повышение	$M = 0,722h - 0,07$	0,99
понижение	$M = 0,721h - 0,02$	0,99
Грядово-мочажинный комплекс гряда	$M = 0,722h - 0,04$	0,99
мочажина	$M = 0,721h - 0,02$	0,99

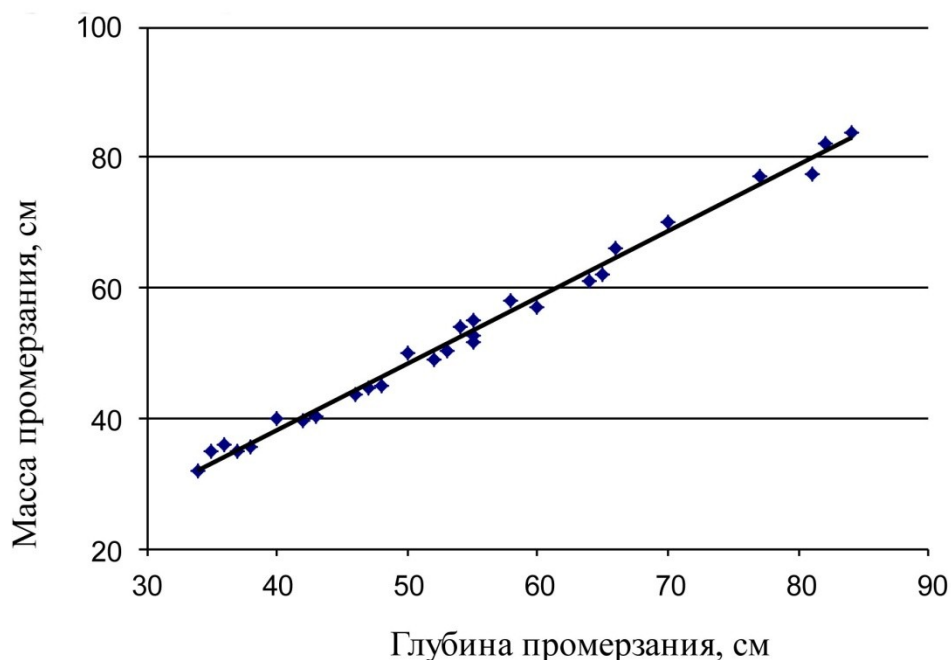


Рис. 6. Зависимость массы промерзания от глубины промерзания мочажин грядово-мочажинного комплекса болотного массива Пулозерское

Высота капиллярного поднятия в деятельном слое мезолиготрофных болот составляет 20–25 см. В предзимних условиях и высоком стоянии уровней болотных вод, обусловленных осенними осадками, создаются условия выхода капиллярной каймы на поверхность мохового очеса. Поэтому в течение зимнего периода путем миграции влаги к фронту промерзания в верхнем горизонте торфяной залежи образуется слой, практически полностью насыщенный влагой. Растительное вещество и его неразложившиеся остатки в таком мерзлом слое армируют лед и повышают несущую способность мерзлого слоя. Прочность плотной торфяной залежи, насыщенной водой, достигает 35–40 кг/см². Последнее позволяет использовать мерзлую торфяную залежь в качестве несущего основания линейных сооружений.

Выводы

Многолетние наблюдения на специализированной сети болотных станций и постов Росгидромета позволили установить среднемноголетние характеристики глубин промерзания болот на территории Кольского п-ова, а также главные факторы, обуславливающие этот процесс. Установлено, что глубина промерзания в основном зависит от температуры воздуха и теплоизолирующих свойств снежного покрова.

Показано, что температура воздуха оказывает определяющее влияние на начальном этапе промерзания, когда мощность снежного покрова небольшая. С увеличением высоты снега более 10–15 см уменьшается влияние температуры воздуха на интенсивность промерзания. Средние из наибольших годовых за многолетний период наблюдений на Пулозерском болоте глубины достигают 58 см, несколько меньше промерзает Краснощельское болото — 51 см. Более южные болота, Алакурттинское и Канозерское, промерзают существенно меньше — 45 и 36 см. Наибольшие глубины — свыше 80–90 см наблюдаются на всех болотах, исключая Канозерское, где они не превышают 54 см.

Пространственная изменчивость глубин промерзания в пределах болотного массива уменьшается от больших значений коэффициента вариации (0,3–0,4) — при глубинах промерзания до 20–30 см до величин менее 0,10 — при глубинах промерзания свыше 60 см. Наибольшая пространственная изменчивость наблюдается в начальный период промерзания и далее уменьшается по мере увеличения глубины промерзания.

Временной ход промерзания Пулозерского болота однозначно показывает, что, начиная с 1977–1978 г., хорошо просматривается тренд уменьшения глубины промерзания под влиянием климатических изменений. Тренд значимый. Его коэффициент корреляции равен 0,56.

Между массой и глубиной промерзания существует зависимость, теснота которой обусловлена высоким содержанием капиллярной влаги. Отсюда теснота связи между глубиной и массой промерзания, определяемая коэффициентом корреляции, приближается к единице. Большое содержание влаги в мерзлом слое в совокупности с неразложившимися остатками растительности создают высокую прочность мерзлого слоя и существенно повышают его несущую способность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романов В. В. Гидрофизика болот. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 359 с.
2. Чечкин С. А. Водно-тепловой режим неосушенных болот и его расчет. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 205 с.
3. Калюжный И. Л. Гидрохимический режим и химический состав вод мезолиготрофных болотных массивов Кольского полуострова // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 3. С. 114–125.
4. Наставление гидрологическим станциям и постам //

Гидрометеорологические наблюдения на болотах. Л.: Гидрометеиздат, 1952. Вып. 8. 228 с. 5. *Калюжный И. Л., Романюк К. Д.* Изменение водного режима болот севера и северо-запада России под влиянием климатических факторов // *Метеорология и гидрология*, 2010. № 7. С. 85–98. 6. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по однородным данным. СПб.: ГГИ, 2010. 162 с.

Сведения об авторе

Калюжный Игорь Леонидович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, зав. отделом гидрофизики Государственного гидрологического института

E-mail: hfl@mail.ru

Author Affiliation

Igor L. Kalyuzhny — PhD (Engineering), Senior Researcher, Head of Hydrophysical Department of the State Hydrological Institute

E-mail: hfl@mail.ru

Библиографическое описание статьи

Калюжный, И. Л. Формирование глубин промерзания болот Кольского полуострова // *Вестник Кольского научного центра РАН / И. Л. Калюжный*. — 2017. — № 1 (9). — С. 124–138.

Reference

Kalyuzhny Igor L. Forming of freezing depth for bogs of the Kola Peninsula. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 1 (9), pp. 124–138 (In Russ.).

**НАУЧНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ,
ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ ОРГАНИЗАЦИЯМИ ФАНО/РАН КОЛЬСКОГО РЕГИОНА НА 2017 г.**

- V Конференция Ассоциации научных обществ Мурманской области, посвященная Дню российской науки
Апатиты, Геологический институт, 8 февраля 2017 г.
- VIII Научная сессия Геологического института КНЦ РАН, посвященная Дню российской науки
Апатиты, Геологический институт, 10 февраля 2017 г.
- Школа по морской биологии «Многообразие биосистем и путей их познания»
Мурманск, Мурманский морской биологический институт, Мурманский государственный технический университет, Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича, 29 февраля — 4 марта 2017 г.
- XL Ежегодный семинар «Физика авроральных явлений»
Апатиты, Полярно-геофизический институт, 13 — 17 марта 2017 г.
- Ежегодный семинар «Полярные процессы в атмосферах планет»
Апатиты, Полярно-геофизический институт, 20 марта 2017 г.
- VII Всероссийская научно-практическая конференция «Теория и практика системной динамики»
Апатиты, Институт информатики и математического моделирования технологических процессов, 27–31 марта 2017 г.
- Международная научно-практическая конференция «Использование современных информационных технологий в ботанических исследованиях»
Апатиты, Институт проблем промышленной экологии Севера, 28 марта 2017 г.
- XIV Всероссийская (с международным участием) Ферсмановская научная сессия, посвященная 100-летию со дня рождения акад. А. В. Сидоренко и д. г.-м. н. И. В. Белькова
Апатиты, Геологический институт, 3 апреля 2017 г.
- XI Межрегиональная научно-техническая конференция молодых ученых, специалистов и студентов вузов «Научно-практические проблемы в области химии и химических технологий»
Апатиты, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева, 19 — 21 апреля 2017 г.
- XXXV Конференция молодых ученых ММБИ КНЦ РАН, посвященная Году экологии в России
Мурманск, Мурманский морской биологический институт, май 2017 г.
- VI Международная научная конференция студентов и аспирантов «Проблемы Арктического региона»
Апатиты, Полярно-геофизический институт, 16 мая 2017 г.

- Всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция «Уникальные геологические объекты Кольского полуострова»
Апатиты, Геологический институт, 10 — 12 июля 2017 г.
- Всероссийская научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов «Информационные технологии в реализации экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли»
Апатиты, Горный институт, 9 — 13 октября 2017 г.
- XIV Всероссийская научная школа «Математические исследования в естественных науках»
Апатиты, Геологический институт, 17 октября 2017 г.
- VI Конференция молодых ученых «Высокоширотные геофизические исследования»
Апатиты, Полярно-геофизический институт, 26 октября 2017 г.
- XIV Всероссийская научная конференция с международным участием «Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа»
Мурманск, Мурманский морской биологический институт, октябрь — ноябрь 2017 г.

XI Ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений»

Полярный геофизический институт, 13 — 17 марта 2017 г.

С 13 по 17 марта 2017 г. в Полярном геофизическом институте г. Апатиты проходил 40-й ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений».

В мероприятии приняли участие около 100 человек (в том числе 59 — из других городов России, из них 31 — молодые ученые) из 25 научно-исследовательских институтов и университетов. Среди участников было 7 представителей зарубежных исследовательских институтов (из Китая, Болгарии, Финляндии и Германии). Было представлено 62 стендовых и 67 устных докладов. Семинар посвящен обсуждению новейших результатов, полученных российскими учеными в области исследования геофизических процессов, наиболее интенсивно проявляющихся на широтах авроральной и субавроральной зон.

Работа семинара проходила по следующим направлениям:

- бури и суббури;
- поля, токи, частицы в магнитосфере;
- волны, взаимодействие волна-частица;
- солнце, солнечный ветер, космические лучи;
- ионосфера и верхняя атмосфера;
- нижняя атмосфера, озон;
- гелиобиосфера.

На семинаре состоялось подведение итогов конкурса на соискание диплома имени Юрия Павловича Мальцева «За лучшую работу молодого российского ученого». В конкурсе участвовали молодые ученые из 7 исследовательских институтов и университетов. Рассматривались работы, опубликованные в 2015–2016 гг. Победителем конкурса стала Андреева Варвара Андреевна (аспирант Санкт-Петербургского государственного университета). Специальным дипломом «За отличную первую публикацию» был отмечен студент III курса физического факультета Московского государственного университета Александр Виноградов.

В рамках культурной программы 40-го Апатитского семинара «Физика авроральных явлений» состоялся концерт, в котором с большой программой выступил молодежный хор Дворца культуры им. В. К. Егорова (Апатиты) под руководством Виктории Филин.

Также были проведены экскурсии в Историко-краеведческий музей города Кировска и «Снежную деревню».

Финансирование семинара проходило за счет средств гранта РФФИ и международной программы по исследованию изменчивости Солнца и его влияния на Землю (VarSITI).

**Школа молодых ученых по морской биологии «Мнообразие биосистем и путей их познания»
Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН
Мурманский государственный технический университет
Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии
им. Н. М. Книповича, 28 февраля — 4 марта 2017.**

Научная школа — плановое мероприятие научно-образовательного центра «Морские экосистемы», созданного на базе ФГБОУ ВПО «МГТУ» (кафедра биологии), ММБИ КНЦ РАН и ПИНРО. В 2017 г. она проводилась в седьмой раз. Основная задача школы — привлечь внимание школьников, студентов, аспирантов региона к проблемам океанологии и морской биологии, изучению биоресурсов арктических морей, освоению новых современных методик познания окружающего мира. В этом году в ее программу было включено несколько мероприятий: биологический диктант для аспирантов, магистрантов и бакалавров; представление работ учащихся в ММБИ и ПИНРО; блиц-конкурс школьников по морской биологии; фотоконкурс «Арктика глазами студентов». Было прочитано несколько научно-популярных лекций о Мировом океане. В качестве докладчиков и слушателей в школе приняли участие около 100 студентов, аспирантов, школьников гимназий г. Мурманска.

Перед слушателями с лекцией «Влияние освещения и температуры на макроводоросли арктических морей» выступил ведущий ученый ММБИ д. б. н. М. В. Макаров. На базе института проведено мероприятие «Представление работ обучающихся в ММБИ». Во время постерной сессии, на которой было представлено 30 стендовых докладов, конкурсное жюри заслушивало и оценивало краткие выступления по тематике сообщений. На сессии жюри оценивались также краткие формулировки конкурсных работ, составленные по принципу «Опишите свою работу простым языком» и озвученные в дайджесте стажером-исследователем ММБИ, магистром МГТУ О. В. Бондаревым. Победителями конкурса на лучшую научную работу были признаны Е. Н. Кроль, К. С. Хачатурова, О. В. Човган, Д. А. Валуйская, А. Орхус, С. А. Чаус.

**VIII Научная сессия Геологического института КНЦ РАН, посвященная Дню российской науки
Геологический институт КНЦ РАН, 10 февраля 2017 г.**

Спецификой данного мероприятия является то, что здесь представляются как традиционные, так и неординарные доклады, высказываются спорные суждения и гипотезы.

Ю. Л. Войтеховский открыл сессию докладом под названием «Новая глава кристалломорфологии». С приветственным словом к участникам обратился вице-президент Северной торгово-промышленной палаты А. Э. Ильин.

Живой интерес вызвали доклады «Макроскопический гравитационный эффект (волна твердого прилива) и квантовая упругость» (автор — В. Л. Ильченко) и «Упруго-анизотропные свойства пород разных фаций метаморфизма» (творческий коллектив — Ф. Ф. Горбацевич, В. Р. Ветрин, О. М. Тришина). С. М. Карпов представил доклад в соавторстве с А. В. Волошиным,

А. А. Компанченко, В. В. Борисовой «Новые данные о минералах. Первые находки в России и Кольском регионе». Е. А. Ниткина сделала доклад «Изотопное ID-TIMS- и SHRIMP-датирование геологических процессов и геохимические особенности пород комплекса TTG Ингозерского блока (Кольский полуостров)».

Украшением сессии стал доклад В. В. Кольки «Палеогеография западного берега Онежского залива Белого моря в позднеледниковое и голоценовое время», подготовленный большим авторским коллективом: В. В. Колька, О. П. Корсакова, А. Н. Толстоброва, Д. С. Толстобров (ГИ КНЦ РАН), Н. Б. Лаврова, Т. С. Шелехова (ИГ КарНЦ РАН), Н. Е. Зарецкая (ГИН СО РАН).

V Конференция Ассоциации научных обществ Мурманской области, посвященная Дню российской науки

Геологический институт КНЦ РАН, 8 февраля 2017 г.

8 февраля в большом зале Геологического института состоялась V Конференция Ассоциации научных обществ Мурманской области.

С приветственным словом к участникам мероприятия обратился Ю. Л. Войтеховский. Конференция началась с подведения итогов прошедшего года. Было представлено множество научно-популярных докладов и сообщений.

О «Вкладе териологов заповедников Мурманской обл. в изучение млекопитающих» рассказала О. А. Макарова (Всероссийское териологическое общество).

Концепция нового географического атласа Мурманской области и некоторые подходы к вопросу развития арктических городов рассматривались в докладах Д. В. Моисеева, С. А. Гончарова (Мурманское областное отделение Русского географического общества).

Доклад с интригующим названием «Шел лорд Кельвин по набережной Темзы...» представил Ю. Л. Войтеховский (Кольское отделение Российского минералогического общества).

Доклады «Полевая работа социального антрополога: путь к достижению поставленных исследовательских задач» и «Змеи в устных преданиях саамов и поморов Кольского п-ова» сделали А. С. Давыдова, О. А. Бодрова (Мурманское областное региональное отделение Ассоциации антропологов и этнологов России).

С несколькими экзотичными названиями «Ботаники, что у вас есть вкусного» и «Грибное импортозамещение, или Ещё раз о необычных съедобных грибах» прочитали доклады Е. И. Копейна, Е. А. Боровичёв, Ю. Р. Химич (Мурманское отделение Русского ботанического общества).

Доклад «Сотрудничество Кольского отделения Микробиологического общества с организациями Мурманской области в рамках выполнения договорных работ» представили Н. В. Фокина и М. В. Корнейкова.

Сообщение об уникальных свойствах воды сделали В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин (Хибинское отделение Гидробиологического общества).

Поразил публику докладом «Поиск путей выхода из кризиса для российской науки» Д. Б. Денисов (Гиперборейская академия наук).

О проекте «ЛАИС» как диалоговой площадке социогуманитарного знания рассказал В. М. Воронов (Российское философское общество).

С докладом о кислородном голодании на Севере выступил В. Н. Петров (НИЦ МБП КНЦ РАН).

По окончании основной части конференции в рамках «круглого стола» обсуждался ряд проблем, связанных со способами популяризации науки и взаимодействием научного сообщества и СМИ.

Дубровский, М. И. Систематика и петрогенезис магматических недосыщенных SiO_2 и Al_2O_3 («щелочных») горных пород / М. И. Дубровский ; отв. ред. А. Н. Виноградов ; Геологический ин-т Кольского науч. центра РАН. — Апатиты : КНЦ РАН, 2016. — 456 с.: ил.

На основе авторской классификационной схемы (Дубровский, 2002а) произведена систематика всех так называемых щелочных пород в сопоставлении с их систематикой по классификационной схеме Петрокомитета (Магматические..., 1983, 1984). Более 70 % «щелочных» пород по классификационной схеме автора оказались нещелочными и более половины эффузивных пород не совпали по диагностике и номенклатуре. Проведенная работа позволила детализировать групповую и рядную принадлежность рассматриваемых пород, а также проверить и уточнить границы и размеры родов на классификационных диаграммах автора. Эти данные рекомендуется использовать при классификации серий магматических горных пород.

Разработан пакет диаграмм состояния, охватывающих широкий спектр систем (от 4- до 8-компонентных) и отражающих в упрощенном виде фазовые превращения в нормативно-минальных системах 10-компонентной оксидной системы.

Предложена модель генерации карбонатно-алюмосиликатных магм в мантии и изменения их состава при перемещении к земной поверхности. Показано, что все многообразие так называемых щелочных магм образуется из трех типов первичных магм (карбонатно-пикритоидных, карбонатно-пикробазальтоидных и карбонатно-базальтоидных) при потере CO_2 , ликвации и кристаллизационной дифференциации.

Работоспособность теоретических разработок проверялась на природных примерах, включающих значительное разнообразие природных представителей (главным образом Кольского п-ова) по размерам, форме и составу.

Книга представляет интерес для широкого круга геологов и петрологов, а также может служить учебным пособием для студентов и аспирантов при изучении курса петрологии магматических пород. Ил. — 186, табл. — 81, библиогр. — 278 публ.

Корчак, Е. А. Трудовой потенциал северных регионов в рамках реализации государственной политики Российской Федерации в Арктике / Е. А. Корчак; Ин-т экон. проблем Кольского науч. центра РАН. — Апатиты: КНЦ РАН, 2017. — 174 с.

Монография посвящена проблемам развития трудового потенциала северных регионов России в рамках реализации государственной политики РФ в Арктике. В ходе исследования изучены теоретические аспекты процессов формирования трудового потенциала северных регионов России, а также зарубежный опыт государственного регулирования процессов формирования и использования трудового потенциала северных территорий. Рассмотрены современные особенности процессов формирования и использования трудового потенциала северных регионов РФ, и проведен анализ трудового потенциала северных регионов РФ с позиций устойчивого территориального развития.

Для научного обоснования приоритетов развития трудового потенциала северных регионов России в рамках реализации государственной политики РФ в Арктике предложен сводный показатель — «интегральный индекс качества трудового потенциала». Приведены результаты интегрированной оценки качества трудового потенциала северных регионов России.

Проанализирована институциональная среда процессов формирования и использования трудового потенциала северных регионов РФ, выявлены институциональные условия, определяющие низкий уровень материального благосостояния и социальную напряженность на территориальных рынках труда. Предложены перспективные приоритеты развития трудового потенциала северных регионов, указаны задачи и инструменты реализации мер государственного регулирования процессов формирования и использования трудового потенциала северных регионов России в рамках реализации государственной политики РФ в Арктике.

Монография рассчитана на широкий круг специалистов, научных работников, преподавателей и студентов высших и средних специальных учебных заведений.

Север и рынок: формирование экономического порядка: науч.-информ. журн. / Ин-т экон. проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН. — Апатиты: КНЦ РАН. — 2016. — 4 (51). — 246 с.

Скуфьина, Т. П. Региональное развитие России в контексте макроэкономических движений / Т. П. Скуфьина. — Апатиты: КНЦ РАН, 2016. — 126 с.

Монография посвящена представлению проблем регионального развития России в контексте глобальных и национальных движений. Тенденции социально-экономического развития России и ее регионов синхронизированы с глобальными ритмами и циклами. Подробно рассмотрены информационно-коммуникационные технологии в России во взаимосвязи с экономическими характеристиками регионов, а также с позиций соответствия мировым тенденциям. Феномен межрегиональной дифференциации социально-экономического пространства России рассмотрен как отражение глобальных движений и национальной политики. Отдельное внимание уделено вопросам развития российского Севера и Арктики в их сопряжении с мировыми и национальными приоритетами, тенденциями, особенностями.

Исследование выполнено в рамках работ над госзаданием ФГБУН ИЭП КНЦ РАН, а также над серией НИР, поддержанных грантами научных фондов. В частности, получили отражение вопросы, рассматривающиеся в исследованиях, поддержанных грантом РФФИ № 16-06-00056 (параграф 1.1), а также грантами РГНФ №14-02-00128 (параграфы 1.2–1.4, 4.1, 4.2), № 16-32-00019 (параграф 3.3), № 15-02-00127 (глава 2), РГНФ и Правительства Мурманской области № 16-12-51004 (параграфы 3.1, 3.2, 4.1).

Монография рассчитана на широкий круг специалистов, включая научных работников, преподавателей высших и средних специальных учебных заведений, а также рекомендована аспирантам по специальностям 08.00.01, 08.00.05, 08.00.13.

Современные проблемы и перспективы развития арктического газопромышленного комплекса / под науч. ред. д-ра экон. наук С. Ю. Козьменко, д-ра экон. наук В. С. Селина. — Апатиты: КНЦ РАН, 2017. — 228 с.

В коллективной монографии исследуется широкий круг проблем, связанных с развитием ресурсной базы, промышленным освоением и логистикой поставок с арктических газоконденсатных месторождений на современном этапе развития глобальной и отечественной экономики. В этой связи серьезное внимание уделено геополитическим и геоэкономическим факторам в Арктике. Анализируются проблемы освоения природных ресурсов в условиях санкционных ограничений и с учетом прогнозной динамики мировых энергетических рынков. Показаны стратегические приоритеты новой энергетики в российской Арктике и основные газовые проекты. Рассматриваются перспективы поставок сжиженного природного газа на азиатский и европейский рынок, экономическая конъюнктура украинского газового транзита. Особое внимание уделено обеспечению национальных интересов и экономической безопасности в Арктике, взаимодействию оборонных и хозяйственных факторов, в том числе в развитию Северного морского пути.

Публикация подготовлена в рамках поддержанного Российским гуманитарным научным фондом проекта 15-02-00009 а «Модернизация системы транспортировки арктического природного газа в условиях современной геоэкономической и политической нестабильности стран-транзитеров».

Отдельные разделы (1.2; 1.6; 2.2; 5.3; 6.1) выполнены по государственному плану научно-исследовательских работ Института экономических проблем КНЦ РАН. Разделы 3.2 и 4.7 подготовлены в рамках НИОКР № 13-17ГЗ «Совершенствование методов оперативной и долгосрочной диагностики среды обитания морских гидробионтов в условиях активного промышленного освоения углеводородов Арктического шельфа», проводимой по государственному заданию Федерального агентства по рыболовству.

Монография может быть полезна широкому кругу научных работников, преподавателей и других специалистов по проблемам глобальной, национальной и региональной экономики, экономики промышленности, природопользования, транспорта и логистики. В первую очередь это относится к освоению и разработке газовых и газоконденсатных месторождений. Книга может быть рекомендована также в качестве учебного пособия студентам и аспирантам соответствующих специальностей.



КАШУЛИНА Галина Михайловна

д. б. н. (2004), заведующая лабораторией почвоведения Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина (2012). В Кольском научном центре работает с 1978 г. после окончания Ленинградского государственного университета, в ПАБСИ — с 2000 г.

Специалист в области генезиса, свойств и географии почв арктических регионов, естественной и антропогенной динамики почвенного покрова Арктики, экологической роли почв в функционировании и современной динамике арктических экосистем и ландшафтов. Комплексные мониторинговые исследования Г. М. Кашулиной в окрестностях самого крупного на севере Европы источника выбросов SO₂ и тяжелых металлов комбината «Североникель» позволили сформировать холистический и географический подход к изучению биогеохимии окружающей среды и выявили изменение всех основных свойств почв, включая морфологическое строение, а также содержание и состав органического вещества в результате длительного воздействия выбросов, что обусловило изменение классификационного положения почв на уроне подтипа и даже типа. Ею было установлено, что экстремальный уровень загрязнения почв тяжелыми металлами не является основным фактором, определяющим состояние экосистем около источника выбросов; при хорошем увлажнении экстремальные уровни загрязнения не могут быть губительными для растений; появление участков с пионерными мхами около источника выбросов после снижения объема выбросов загрязняющих веществ сопровождается формированием нового постаэротехногенного органогенного горизонта O_{rat}, предотвращающего их дальнейшую деградацию и способствующего дальнейшему восстановлению растительности.

Галина Михайловна — авторитетный ученый, автор более 150 публикаций, в том числе 5 монографий. Принимала участие в качестве международного эксперта по закисляющим и загрязняющим веществам в Арктике в рамках Программы мониторинга и оценки для Арктики (Arctic Monitoring and Assessment Programme (2006)), является членом Научного совета Российского научного центра на арх. Шпицберген (2016).



Юбилей



Юбилеи

Отмечена Благодарностью (2006) и награждена Почетной грамотой (2011) губернатора Мурманской обл.

Поздравляем Галину Михайловну с юбилеем и желаем крепкого здоровья, творческих успехов, удачи во всех начинаниях!



ФИЛАТОВА Валентина Тимофеевна

д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник лаборатории поисковых исследований Геологического института КНЦ РАН. Работает в институте с 1976 г.

После окончания в 1976 г. Ленинградского государственного университета по специальности «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых» трудится в Геологическом институте, сначала в должности инженера, затем младшего научного сотрудника, с 1999 г. — старшего научного сотрудника, с 2005 г. — ведущего научного сотрудника.

В первые годы своей научной деятельности Валентина Тимофеевна занялась обработкой и комплексным анализом результатов исследований по развитию теории интерпретации гравитационного и магнитного полей. Область научной деятельности обширна: создание объемных физических моделей рудных районов Кольского п-ова и выявление их возможной связи с особенностями глубинного строения региона; развитие методов математического моделирования геологических процессов; тектонофизическое обоснование возможных геодинамических характеристик раннего докембрия северо-восточной части Балтийского щита и реконструкция геодинамического механизма формирования земной коры. В 2004 г. Валентина Тимофеевна успешно защитила докторскую диссертацию на тему «Тектонофизическое моделирование геодинамических режимов формирования континентальной коры (на примере северо-восточной части Балтийского щита)». После получения ученой степени продолжала активно развивать свои знания в направлении оценки геодинамических характеристик раннего докембрия и реконструкции геодинамических механизмов формирования земной коры Балтийского щита. Исследования Валентины Тимофеевны Филатовой имеют широкий резонанс, результаты опубликованы во многих научных журналах. Ею опубликовано более 90 научных работ. В настоящее время Валентина Тимофеевна разрабатывает геолого-геофизическую модель земной коры Кольского региона.

Поздравляем Валентину Тимофеевну с юбилеем и желаем крепкого здоровья, счастья и дальнейших творческих успехов.



ВИНОГРАДОВА Светлана Николаевна

к. э. н., в Кольском научном центре работает с 1989 г.

Автор разработки концептуальных подходов к регулированию положения коренных малочисленных народов Севера.

Сфера научных интересов — устойчивое развитие регионов Севера,

положение социально уязвимых групп населения, этнокультурные взаимодействия, изучение и сохранение культурного наследия в регионе, применение математических методов и информационных технологий в гуманитарных дисциплинах, гендерные исследования.

В 1989 г. С. Н. Виноградова окончила математико-механический факультет Ленинградского государственного университета по специальности «Прикладная математика». С 1996 г. Светлана Николаевна — сотрудник Центра гуманитарных проблем Баренц-региона КНЦ РАН (бывший МЦНКО КНЦ РАН), где с 2005 по 2014 гг. работала в должности ученого секретаря организации.

Светлана Николаевна — автор и соавтор более 70 научных публикаций, в том числе 5 коллективных монографий. В 2012 г. была опубликована ее монография «Коренные малочисленные народы Севера: социально-экономические аспекты государственной политики», удостоенная почетного диплома участника регионального конкурса научно-исследовательских работ, направленных на социально-экономическое развитие Мурманской обл.

Принимала участие во многих научных проектах Кольского научного центра, в том числе:

- по программам фундаментальных исследований РАН (проект «Ловозеро. История формирования и современные особенности жизни переселенных групп саамов» в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Этнокультурные взаимодействия в Евразии» (2002–2005 гг.); проект «Современные локальные сообщества Кольского Севера на этапе трансформации российского общества: проблемы социокультурной адаптации и интеграции» в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Адаптация народов и культур к изменениям природной среды, социальным и техногенным трансформациям» (2006–2008 гг.);

- в рамках контрактных работ (проект «Изучение отношения населения к намечаемому строительству завода по производству сжиженного газа в рамках проекта комплексного освоения Штокмановского газоконденсатного месторождения», заказчик — ОАО «Гипроспецгаз» (2006); проект



Юбилей



Юбилеи

по разработке Концепции и «Стратегии социально-экономического развития Мурманской области до 2025 года», заказчик — Правительство Мурманской области (2007–2008));

- в международных проектах (проект ООН «Концепция устойчивого развития Мурманской области и российской части региона Баренцева моря» (1997); российско-норвежский проект по регистрации и картографированию памятников культуры саамов-скольтов Северной Норвегии, Финляндии и Северо-Запада Кольского полуострова (1997–2001); российско-норвежские проекты «Социальные процессы в приграничных территориях» (2002) и «О предполагаемом воздействии развития нефтегазовых проектов на социально-экономическое развитие Мурманской области. Petrodevelopment – 2030» (2007); проект Программы KOLARCTIC «Устойчивая горная промышленность, местные сообщества, экологическое регулирование – SUMILCERE (2013–2014); Проект Арктик Центра (Финляндия) «Understanding security: Perspectives of Northern Indigenous Peoples» (2015–2016)).

Член ученого совета ЦГП КНЦ РАН, более 10 лет — ученый секретарь данного совета, член Международного координационного совета по вопросам изучения российских саамов при Высшей саамской школе в Норвегии (с 2007), секретарь общественной организации «Кольский центр гендерных исследований» (1996–2005). Кроме того, Светлана Николаевна, как преподаватель КФ ПетрГУ, является автором программы и курса лекций по математическим методам в исторических исследованиях.

Искренне поздравляем Светлану Николаевну с юбилеем и желаем крепкого здоровья, творческих успехов, удачи, новых научных свершений!

80



ГОРЯИНОВ Павел Михайлович

д. г.-м. н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории комплексного анализа уникальных рудоносных систем.

В Геологическом институте КНЦ РАН работает с 1955 г.

Выпускник Воронежского университета Павел Михайлович Горяинов на днях отметил

в кругу учеников и друзей свое 80-летие. Профессор Горяинов прошел все ступеньки от аспиранта Геологического института до главного научного сотрудника. Самый молодой доктор за всю историю института создал и долгое время возглавлял железорудное направление в исследовании раннего докембрия восточной части Балтийского щита.

Его работы охватывали широкий спектр общегеологической проблематики раннего докембрия. По его собственному признанию, чем глубже и разнообразнее оказывались попытки создать нечто целостное, тем очевиднее становилось то, что современная теоретическая геология опирается не на фундаментальные кирпичи научного знания, прежде всего на физически осмысленные модели, а на их многочисленные фантомы. Это когда боль в ноге есть, а самой ноги нет. Фантомной является даже такая теоретическая машина, как метаморфизм. Оказывается, что высокоэнергетические минеральные парагенезисы могли формироваться не на глубинах 10–20 км, а на поверхности, что энергетический вклад температуры и давления значительно уступал эмиссии частиц высоких энергий. И еще один, совершенно неожиданный вывод: классическая складчатость является явлением фантомным: в ее возникновении ответственны не столько процессы пассивного отклика на внешние силы, сколько собственная реакция (к примеру, автоволновая) на эти силы. Отсюда все популярные упражнения со сжатием-растяжением, тектоническим транспортом разных амплитуд — это не более чем игра ума, даже если она изящная. Перечень этих научных полумистификаций обширен. Если знать характер П. Горяинова, то завершением его научной карьеры это, конечно, стать не могло. Последние 25 лет он создавал школу новой, нелинейной геологии. Его книга, написанная вместе с любимым учеником Григорием Иванюком «Самоорганизация минеральных



Юбилеи



Юбилей

систем», получила отклик в широких кругах научной общественности. В своем письме нобелевский лауреат Илья Пригожин отметил, что «не всякий физик располагает такими идеальными экспериментами, которыми Вы успешно воспользовались в лаборатории Природы». Возможности «новой» геологии были продемонстрированы на решении традиционной задачи перспективной оценки территорий различного масштаба — их прогнозно-геологической оценки. Эта работа получила статус победителя геологического ведомства России.

Созданная в свое время лаборатория самоорганизации минеральных систем сейчас занимается проблемой уникальных месторождений Кольского п-ова и укомплектована исключительно учениками профессора. Выражая признательность заслугам своего учителя, они назвали новый минерал из железорудного месторождения Северной Швеции его именем — горяиновит.

Поздравляем Павла Михайловича с юбилеем и желаем крепкого здоровья, неугасаемой энергии, успешного претворения в жизнь научных идей!



КАРЖАВИН Владимир Константинович

к. х. н., старший научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики Арктики Геологического института КНЦ РАН.

После окончания в 1966 г. химического факультета Московского государственного университета работает в ГИ КНЦ РАН.

В 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Термодинамическое исследование условий существования и генезиса газов магматических щелочных пород». Специалист

в области петрологии и геохимии. Впервые на основе использования регрессивного анализа и метода сравнительного расчета определил термодинамические величины фосфатов кальция (апатитов), цеолитов, амфиболов, эвдиалита, элементов платиновой группы, а также сульфидов, селенидов, теллуридов платины и палладия, которые принимаются в качестве информативных исходных массивов для отечественных и зарубежных банков данных по термохимическим константам химических соединений. Провел ряд исследований природных петрологических и геологических процессов. Разработал геохимические модели ряда систем, базирующихся на характере распределения макро- и микроэлементов в природных объектах в зависимости от термодинамических параметров, с учетом

термобарометрического расчета равновесного состояния среди сосуществующих минералов для выявления процесса эволюции минеральных ассоциаций.

Владимир Константинович отзывчив, внимателен к окружающим, многие годы руководил профсоюзной организацией Геологического института.

Поздравляем Владимира Константиновича с юбилеем и желаем ему крепкого здоровья, счастья и дальнейших творческих успехов!



ПУТИЛОВ Владимир Александрович

д. т. н., профессор. Со дня основания в 1989 г. Института информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН является его директором

После окончания в 1971 г. Ленинградского института авиационного приборостроения поступил в аспирантуру, где занимался разработкой и исследованием методов контроля и коррекции ошибок моделирования процессов с распределенными параметрами на ЦВМ, а также моделированием и разработкой алгоритмов для многоуровневых распределенных систем управления комплексными экспериментальными исследованиями и испытаниями. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию.

После окончания аспирантуры с 1974 по 1989 гг. работал в Сибирском институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн СО АН СССР. В период 1976–1988 гг. руководил работами по созданию системы автоматизации научных исследований на уникальной исследовательской установке — Сибирском солнечном радиотелескопе, а также работой по научно-техническим программам ГКНТ СССР. В итоге была создана территориально-распределенная автоматизированная система, обеспечивающая реализацию комплексных исследований солнечно-земных связей, за что в 1997 г. был удостоен премии Правительства РФ в области науки и техники.



Юбилеи



Юбилеи

В работах В. А. Путилова сформулирована концепция функционально-целевого подхода к решению задач системного анализа и синтеза сложных систем. На основе предложенного подхода разработаны модели и методы концептуального проектирования структурно-алгоритмической организации и программного обеспечения многоуровневых распределенных автоматизированных систем для научных исследований. Опубликован ряд работ по функционально-целевому синтезу и анализу моделей системной динамики и соответствующих информационных технологий для управления развитием региональных социально-экономических систем.

Владимир Александрович — автор и соавтор более 200 научных работ, в т. ч. 10 монографий по вопросам анализа, синтеза сложных систем и практической реализации информационных технологий в научных исследованиях и наукоемких приложениях. Научный руководитель исследований института, ряда хозяйственных работ и международных проектов. Член оргкомитетов и программных комитетов национальных и международных конференций.

Под его руководством 25 сотрудников института подготовили и защитили диссертации на соискание ученых степеней доктора наук и кандидата наук. Руководит созданной им на базе института научной школы «Разработка информационных технологий управления региональным развитием», которая в 2006 г. была включена в перечень ведущих научных школ России.

С 1991 г. занимался созданием Кольского филиала Петрозаводского государственного университета, который организован как центр университетского образования, тесно интегрированный с КНЦ РАН. С 1994 по 2015 гг. возглавлял созданный филиал, который за годы своего развития стал одним из ведущих вузов в Мурманской обл. — центром подготовки специалистов для различных сфер деятельности в регионе.

В. А. Путилов награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени (1999), орденом Дружбы (2005). Почетный работник высшего профессионального образования РФ (2009), ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» (2011). Имеет другие почетные грамоты РАН, Министерства образования и науки РФ.

Поздравляем Владимира Александровича со славным юбилеем и желаем здоровья, бодрости, счастья и новых творческих успехов!

65



КРЕМЕНЕЦКИЙ Вячеслав Георгиевич

к. х. н., старший научный сотрудник лаборатории высокотемпературной химии и электрохимии Института химии и редкоземельных элементов и минерального сырья. Работает в КНЦ РАН с 1976 г.

Окончил физический факультет Московского государственного университета в 1976 г. Вся его трудовая деятельность связана институтами КНЦ РАН — Геологическим и ИХТРЭМС, в котором работает с 1979 г.

В 1991 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Структурные и фазовые превращения некоторых слоистых алюмосиликатов в процессе гидрохимической обработки и их использование для синтеза новых материалов».

В настоящее время круг научных интересов весьма широк и включает в себя компьютерное моделирование строения расплавленных солей, термодинамику электрохимических реакций в расплавах, квантово-химическое моделирование переноса заряда в электрохимических процессах. В. Г. Кременецким получен ряд важных научных результатов в области развития теории переноса заряда в солевых расплавах, разработан метод квантово-химического расчета энергии активации переноса заряда на основе теории Маркуса в системах, включающих в себя две или три координационные сферы галогенидного комплекса переходного металла. В. Г. Кременецким предложен квантово-химический расчет относительной устойчивости частиц с различным внешнесферным составом в больших системах, проводятся исследования по квантово-химическому моделированию электрохимических процессов переноса заряда в системах, содержащих в своем составе кластер, моделирующий поверхность электрода. Не имеет аналогов в мире разработанный В. Г. Кременецким квантово-химический метод расчета локальной энергии взаимодействия атомов или фрагментов системы. Этот метод позволяет дать характеристику химического взаимодействия пары атомов (фрагментов) в квантовых состояниях с предварительно реализованным химическим взаимодействием каждого атома (фрагмента)



Юбилей



Юбилеи

рассматриваемой пары с его внешним окружением и характеризует энергию «чистого» взаимодействия пары атомов или фрагментов в данной системе.

В. Г. Кременецкий — автор более 100 научных публикаций и 4 патентов.

Его доброжелательность, глубина его научных знаний и широкая эрудиция в самых разных областях вызывают искреннее восхищение и уважение сотрудников лаборатории и института. В своем отношении к работе Вячеслав Георгиевич являет яркий пример настоящего служения науке.

Поздравляем Вячеслава Георгиевича с юбилеем и желаем крепкого здоровья, новых творческих достижений, удачи во всех начинаниях!

Александр Александрович ПРЕДОВСКИЙ

16 ноября 1928 – 31 марта 2017



Александр Александрович Предовский, один из старейших сотрудников Геологического института, выдающийся геолог и геохимик, скончался в Санкт-Петербурге в ночь с 30 на 31 марта.

Окончил Ленинградский государственный университет в 1952 г., после окончания учебы он поступил в аспирантуру ЛГУ, а в 1956 г. защитил кандидатскую диссертацию. С 1956 по 1959 гг. был направлен на работу в Китай главным геологом крупной геолого-поисковой экспедиции, затем в течение года он преподавал в Пекинском геологическом институте. С 1961 по 1965 гг. он работал в Ленинградском государственном университете, где получил звание доцента.

В 1965 г. Александр Александрович был приглашен на работу в Геологический институт Кольского филиала АН СССР на должность заведующего лабораторией минералогии и геохимии редких элементов. В дальнейшем долгие годы работал в должности заведующего лабораторией геохимии. В 1987 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Проблема распознавания протоприроды метаморфитов и эволюция седиментогенеза и вулканизма докембрия». Проведенные А. А. Предовским и его сотрудниками исследования метаморфических комплексов докембрия региона позволили внести существенный вклад в общую периодизацию событий докембрия и проблемы перспектив рудоносности метаморфических комплексов. Диаграмма Предовского, позволяющая расшифровывать первичную природу супракрустальных образований, вошла во все справочники по геохимии и широко используется в современных научных работах и учебниках. Созданное А. А. Предовским новое направление исследований по реконструкции первичной природы и условий формирования метаосадков и метавулканитов активно развивается с использованием автоматизации и математического моделирования. Многие из его работ послужили основой для практики геолого-съемочных полевых работ на месторождениях полезных ископаемых.

Все эти и последующие годы Александр Александрович активно готовил научные кадры высшей квалификации и воспитал когорту блестящих геологов-геохимиков. Начиная с 1969 г. он руководил аспирантами, его ученики первого выпуска — А. М. Ахмедов, А. А. Жангуров, Ю. И. Ильин. В дальнейшем он руководил аспирантской подготовкой В. А. Мележика, Н. Е. Козлова, Ж. А. Федотова, А. А. Иванова и многих других. В результате педагогической деятельности А. А. Предовского была создана мощная геохимическая школа, многие ученики Александра Александровича стали выдающимися геологами-геохимиками и внесли значительный вклад в современные науки о Земле. Под его руководством кандидатами наук стали 12, а докторами — 5 сотрудников и учеников.

С 1991 г. А. А. Предовский — ведущий научный сотрудник ГИ КНЦ РАН. В эти годы он продолжал работы в области геолого-геохимических исследований метаморфизованных супракрустальных комплексов докембрия, их тектоники, состава, эволюции и рудоносности, изучения древнейшего седиментогенеза и вулканизма.

В 1990-е гг. после создания филиалов вузов в Апатитах Александр Александрович, профессор МГТУ, читал курсы лекций «Геохимия», «История и методология геологических наук», «Формационный анализ супракрустальных толщ», «Философские проблемы естествознания» в АФ МГТУ и КФ ПетрГУ.

Александр Александрович Предовский — автор более 180 публикаций, в том числе 12 монографий, 15 изобретений, 35 научных отчетов.

Сотрудники Геологического института запомнят Александра Александровича Предовского как яркую, неординарную личность, блестящего талантливую человека, выдающегося геолога и педагога.

Эдуард Владимирович ВАШЕНЮК

13 марта 1944 – 18 марта 2017



После продолжительной болезни ушел из жизни один из старейших сотрудников Полярного геофизического института д. ф.-м. н. Э. В. Вашенюк.

В 1966 г. Эдуард Владимирович окончил физический факультет Белорусского государственного университета. С 1967 г. работал в Полярном геофизическом институте. В 1969–1971 гг. участвовал в 15-й Советской антарктической экспедиции на станции «Мирный», выполняя программу стратосферных измерений космических лучей на шарах-зондах. С 1971 по 2015 гг. работал в лаборатории космических лучей (ст. научный сотрудник, зав. лабораторией, зав. сектором).

Основная научная деятельность Эдуарда Владимировича была связана с проведением экспериментальных исследований космических лучей на уровне Земли и в стратосфере, теоретическим анализом и модельной интерпретацией результатов. В 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование коронального распространения солнечных протонов в области энергий выше 100 МэВ», а в 2000 г. — докторскую диссертацию на тему «Релятивистские протоны в солнечных космических лучах».

Принимал активное участие в составлении трех томов «Каталогов СПС» в составе группы ведущих отечественных специалистов по космической физике. Автор более 100 научных работ в реферируемых изданиях. Под его руководством защитились 4 кандидата наук.

За годы научной деятельности Эдуард Владимирович стал высококлассным и авторитетным специалистом мирового уровня в области физики солнечных космических лучей. Всю жизнь он активно занимался спортом. Был мастером спорта по альпинизму, летал на дельтаплане и парашуте, любил ходить на лыжах.

Надежный и верный товарищ в экспедициях, ответственный и заботливый начальник лаборатории, скромный и трудолюбивый, Эдуард Владимирович пользовался заслуженным авторитетом среди сотрудников лаборатории и института.

Сотрудники Полярного геофизического института сохраняют благодарную память о друге, товарище и коллеге Эдуарде Владимировиче Вашенюке на долгие годы.



КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
184209, Мурманская область, г.Апатиты, ул.Ферсмана, 14

KOLA SCIENCE CENTRE
14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, RUSSIA

