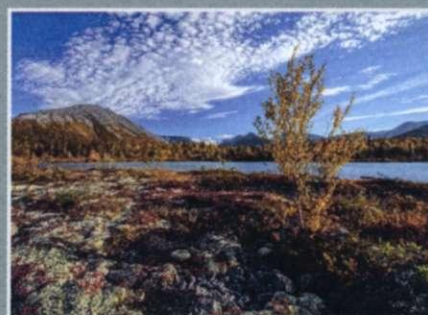


*Российская Академия Наук*

# ВЕСТНИК

Кольского научного центра РАН

3/2016



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

3/2016(26)

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.**

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАУКИ О ЗЕМЛЕ

В. В. Балаганский, И. А. Горбунов, С. В. Мудрук	Палеопротерозойские Лапландско-Кольский и Свекофеннский орогены (Балтийский щит).....	5
Ю. Л. Войтеховский, Д. Г. Степенщиков	Специальные комбинации кристаллических простых форм.....	12
Е. В. Мартынов, Н. Е. Козлов, Н. О. Сорохтин и др.	Метод реконструкции геодинамических обстановок формирования комплексов докембрия с учетом эволюции химического состава мантии..	22
М. Н. Петровский	Ультращелочные эвдиалитовые фонолиты контозерского карбонатитового палеовулкана (Кольский полуостров): геология, минералогия и геохимия.....	27
Т. В. Рундквист, П. В. Припачкин, Я. А. Мирошникова и др.	Новые данные о геологическом строении и благороднометалльной минерализации Южноспочинского массива (раннепротерозойский Мончегорский комплекс, Кольский регион).....	44
С. В. Терещенко, Е. Г. Веселова, С. А. Алексеева и др.	Изучение магнитных свойств типов руд и пород Колвицкого месторождения для оценки возможности кускового обогащения.....	53

### БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

А. Г. Дворецкий, В. Г. Дворецкий	Проблемы и перспективы культивирования двустворчатых моллюсков в Баренцевом море .....	57
В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин	Тяжелые металлы в донных отложениях озер центральной и юго-западной частей Мурманской области.....	73
В. И. Демин, Б. В. Козелов, Н. И. Елизарова и др.	Влияние рельефа на микроклиматическую изменчивость зимней температуры воздуха в городе Апатиты.....	89
Г. А. Евдокимова, Н. П. Мозгова	Бактериальный аэропланктон приземного слоя воздуха различных природных и промышленных зон в Кольской Арктике.....	96
Н. М. Калинкина, Д. А. Петрашова, С. В. Дрогобужская и др.	Оценка изменения токсичности растворов никеля для водных и наземных тест-объектов в присутствии магния.....	105
И. Л. Калюжный	Гидрохимический режим и химический состав вод мезоолиготрофных болотных массивов Кольского полуострова.....	114

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

А. Я. Фридман	Организация имитационного моделирования промышленно-природных комплексов.....	126
	<b>ЖИЗНЬ НАУКИ. КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ</b> .....	139
	<b>КНИГОИЗДАНИЕ</b> .....	143
	<b>ЮБИЛЯРЫ</b> .....	144
	<b>AD MEMORIAM</b> .....	151

#### Редколлегия:

д. т. н. А. Я. Фридман (руководитель редакции), 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)

3/2016 (26)

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 —

Yu. 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. Zhirov, 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

Victor V. Balagansky, Il'ya A. Gorbunov, Sergey V. Mudruk Yury L. Voytekhovskiy, Dmitry G. Stepenshchikov Eugene V. Martynov, Nicholas E. Kozlov, Nicholas O. Sorokhtin et al. Michael N. Petrovsky	Palaeoproterozoic Lapland-Kola and Svecofennian Orogens (Baltic Shield).....	5
Tatyana V. Rundkvist, Paul V. Pripachkin, Yana A. Miroshnikova et al.	Special Combinations of Crystalline Simple Forms.....  A Reconstruction Method for Geodynamic Formation Conditions In Precambrian Complexes Considering Evolution of the Mantle Chemical Composition..... Ultra-Alkaline Eudialite Phonolite from Kontozero Carbonatite Paleovolcano (Kola Peninsula): Geology, Mineralogy and Geochemistry..... New Data on Geological Structure and Noble Metals Mineralization in Yuzhnosopchinsky Massif (Early Proterozoic Complex in Monchegorsk Area, Kola Region).....	12   22 27 44
Sergei V. Tereshchenko, Elena G. Veselova, Svetlana A. Alekseeva et al.	Study of Magnetic Properties of Ore Types And Rocks from the Kolvitskoe Deposit for Estimating Potential of Lumpy Benefication.....	53

### BIOSCIENCES

Alexander G. Dvoretzky, Vladimir G. Dvoretzky Vladimir A. Dauvalter, Nikolai A. Kashulin Valery I. Demin, Boris V. Kozelov, Natalia I. Elizarova et al. Galina A. Evdokimova, Natalya P. Mozgova Natalia M. Kalinkina, Dina A. Petrashova, Svetlana V. Drogobuzhskaya et al. Igor L. Kalyuzhny	Problems and Perspectives of the Bivalve Mollusks Aquaculture in the Barents Sea..... Heavy Metals in Lake Sediments of the Central and Southwest Parts of the Murmansk Region..... Topography Influence on Microclimatic Variation of Winter Air Temperature in Apatity Town.....  Bacterial Aeroplankton in the Surface Layers Air from Different Natural and Industrial Zones of the Kola Arctic..... Evaluation of Changes of Nickel Solution Toxicity for Aquatic and Surface Test-Objects in the Presence of Magnesium.....  Hydrochemical Regime and Chemical Composition of Water from Mezo- Oligotrophic Boggy Lands within the Kola Peninsula.....	57 73 89  96 105  114
--	---	--

### ENGINEERING SCIENCES

Alexander Ya. Fridman	Planning of Simulation for Industry-Natural Complexes.....	126
	<b>CONFERENCES, WORKSHOPS</b> .....	139
	<b>NEW BOOKS</b> .....	143
	<b>ANNIVERSARIES</b> .....	144
	<b>AD MEMORIAM</b> .....	151

#### Editorial Board:

A. Ya. Fridman, Dr. Sci. (Eng.) — Head of Editorial Staff; 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

УДК 551.24

## ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЕ ЛАПЛАНДСКО-КОЛЬСКИЙ И СВЕКОФЕННСКИЙ ОРОГЕНЫ (БАЛТИЙСКИЙ ЩИТ)\*

**В. В. Балаганский<sup>1,2</sup>, И. А. Горбунов<sup>1</sup>, С. В. Мудрук<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

<sup>2</sup>ФГБОУ Мурманский государственный технический университет

### Аннотация

Лапландско-кольская коллизионная орогения (~2.0–1.9 млрд лет) проявилась на севере Балтийского щита, а свекофеннская аккреционная (1.9–1.8 млрд лет) — на его юго-западной половине. Последовательное проявление этих орогений во времени и пространстве позволяет объединить их в лапландско-свекофеннскую орогению тюркского типа. Палеопротерозойские орогении тюркского типа, по-видимому, охватили весь Северо-Атлантический регион и привели к образованию значительной части суперконтинента Нуна, одним из сохранившихся фрагментов которого является Балтийский щит.

### Ключевые слова:

*палеопротерозой, тектоника, орогения тюркского типа, Балтийский щит.*

### PALAEOPROTEROZOIC LAPLAND-KOLA AND SVECOFENNIAN OROGENS (BALTIC SHIELD)

**Victor V. Balagansky<sup>1,2</sup>, Il'ya A. Gorbunov<sup>1</sup>, Sergey V. Mudruk<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Geological Institute of the KSC of the RAS

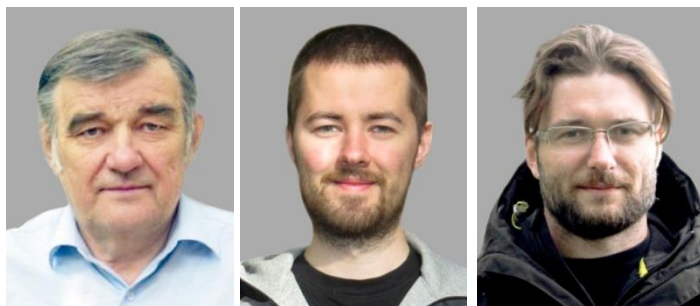
<sup>2</sup>Murmansk State Technical University

### Abstract

The Lapland-Kola collisional orogeny (~2.0–1.9 Ga) occurred in the northern Baltic Shield, and the Svecofennian accretionary orogeny (~1.9–1.8 Ga) took place in the southwestern half of this shield. The successive (in time and space) development of these two orogenies allows integrating them into the Lapland-Svecofennian turgic-type orogeny. Palaeoproterozoic turgic-type orogenies seemed to occur throughout the North Atlantic region and resulted in formation of a considerable portion of the Nuna supercontinent with the Baltic Shield being one of its survived fragments.

### Keywords:

*Palaeoproterozoic, tectonics, turgic-type orogeny, Baltic Shield.*



### Введение

На Балтийском щите выделяются две крупные тектонические единицы, которые важны для понимания как природы палеопротерозойского орогенеза, так и его роли в образовании этого щита. Первая из них — это давно и хорошо известный Свекофеннский ороген, занимающий почти половину

---

\* Данные по обоим орогенам в краткой форме обобщены в рамках темы НИР ГИ КНЦ РАН № 0231–2015–0004, а их сравнительный анализ завершен при финансовой поддержке РФФИ (проект 16–05–01031А).

Балтийского щита (рис. 1). Вторая тектоническая единица — Лапландско-Кольский ороген на севере Балтийского щита, заметно уступающий Свеккофеннскому орогену по размерам.

Лапландско-Кольский ороген был выделен всего лишь в начале 1990-х гг. [1], но вместе со Свеккофеннским орогеном сразу же стал одним из важнейших объектов исследований по проекту ЕВРОПРОБы «СВЕКАЛАПКО» (СВЕ = Свеккофеннский ороген, КА = Карельский кратон, ЛАПКО = Лапландско-Кольский ороген [2]). В настоящей статье дается краткое сравнение этих двух орогенов и оценка роли лапландско-кольской и свеккофеннской орогений, которую они сыграли в образовании Балтийского щита как одного из фрагментов палеопротерозойского суперконтинента Нуна (Колумбия, Нена).

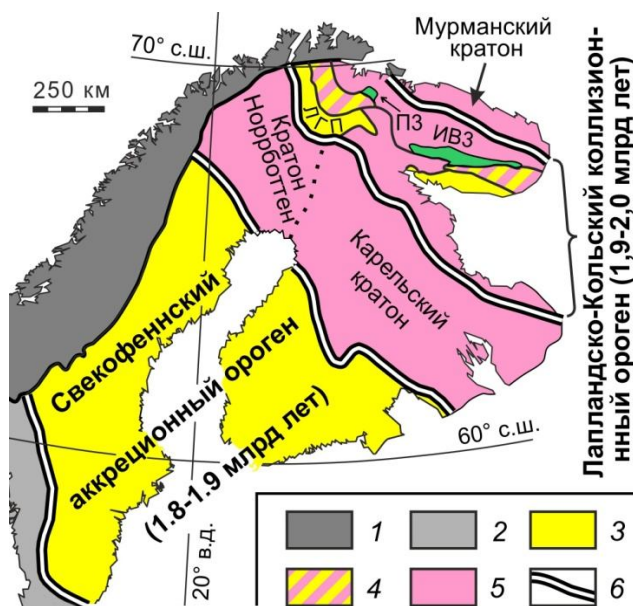


Рис. 1. Главные тектонические структуры Балтийского щита (ЛГП — Лапландский гранулитовый пояс; ПЗ и ИВЗ — Печенгская и Имандра-Варзугская зоны палеопротерозойского рифта Печенга–Имандра-Варзуга): 1 — рифей и фанерозой; 2 — мезо- и палеопротерозойская ювенильная кора; 3 — палеопротерозойская ювенильная кора; 4 — палеопротерозойская (ювенильная) и архейская кора; 5 — архейская кора; 6 — границы палеопротерозойских орогенов

### Лапландско-Кольский коллизионный ороген

Основу Лапландско-Кольского орогена составляют Лапландский гранулитовый пояс (террейн) и палеорифт Печенга–Имандра-Варзуга. Результаты их изучения положили начало разработке тектонических сценариев для палеопротерозоя северной части Балтийского щита с позиций тектоники литосферных плит [3–9]. Следует также отметить концепцию Кольского коллизии, сочетающую одновременное проявление в названных выше структурах тектонических режимов соответственно сжатия (коллизии блоков континентальной коры) и растяжения (рифтинга) [10]. Наиболее полное развитие плитотектонический сценарий нашел в концепции палеопротерозойского Лапландско-Кольского мобильного пояса или орогена. Впервые представления о Лапландско-Кольском орогене сформулированы Д. Бриджуотером и его соавторами [1]. Согласно этим исследователям, Лапландско-Кольский ороген есть альпинотипный коллизионный пояс, прослеживаемый через Атлантику в Гренландию и Канаду. Эта концепция затем была существенно развита и детализирована в процессе исследований по проекту ЕВРОПРОБы "СВЕКАЛАПКО" [2].

В составе Лапландско-Кольского орогена выделяют орогенное ядро (Лапландский гранулитовый пояс, террейны Инари, Умбинский гранулитовый, Терский и Стрельнинский), а также северо-восточный и юго-западный форланды (Кольская и Беломорская провинции

соответственно; рис. 2). Протолиты пород Лапландского гранулитового пояса, а также Умбинского гранулитового и Терского террейнов геохимически сходны с островодужными породами и произошли из палеопротерозойских ювенильных источников, при этом часть из них (преимущественно осадочные) содержат примесь архейской континентальной коры [2, 9, 11–14]. В состав орогенного ядра также входят коллизионные меланжи Танаэля и Колвицкий, которые подстилают Лапландский гранулитовый пояс и Умбинский гранулитовый террейн соответственно и отделяют их от подстилающих беломорских гранитогайсов архея [9]. Наиболее хорошо изучен Колвицкий меланж, в составе которого выделены тектонические пластины и линзы пород с возрастными примерами 2.7, 2.4–2.5 и 1.9–2.0 млрд лет.

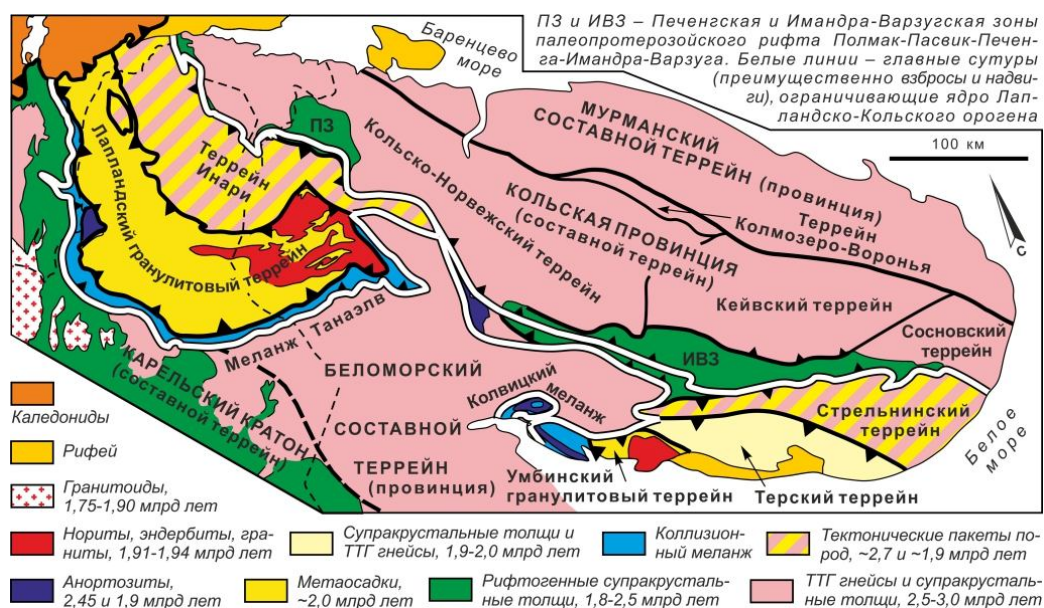


Рис. 2. Схема тектонического районирования северо-восточной части Балтийского щита (по В. В. Балаганскому [2], с учетом геофизических данных из работ [15, 16])

Террейны Инари и Стрельнинский представляют собой тектонический коллаж палеопротерозойских островодужных и архейских пород [2, 9]. Возраст кристаллизации наиболее древних плутонических и вулканических пород орогенного ядра составляет 1.96–1.97 млрд лет [2, 8, 17, 18]. Значения Sm-Nd модельного возраста магматических и метаосадочных пород в орогенном ядре в среднем равны 2.3 млрд лет при максимальном значении 2.5 млрд лет [2, 9]. Более того, для пород Терского террейна, включая серые гнейсы, относимые к древнейшему фундаменту, все значения Sm-Nd модельного возраста (большинство из них получены в ГИ КНЦ РАН под руководством Т. Б. Баяновой и обработаны В. И. Пожиленко [19]), не превышают 2.2 млрд лет при возрасте магматических цирконов 1.96–1.97 млрд лет [2, 8].

Породы Лапландского гранулитового пояса и Умбинского гранулитового террейна испытали гранулитовый метаморфизм при максимальных значениях давления [7, 20], зафиксированных в том числе парагенезисом ортопироксена и силлиманита, равновесным как петрологически, так и структурно [21–23]. Лапландский гранулитовый пояс в целом представляет собой синформу и залегает на породах Беломорской провинции, метаморфизованных в условиях амфиболитовой фации [11, 12]. В подстилающих его породах наблюдается обратная метаморфическая зональность [20]. Она также отмечена в Терском террейне [24]. Главные надвиговые движения во время лапландско-кольской орогении, приведшие к тектоническому перекрытию гранулитами пород более низкой ступени метаморфизма, происходили с севера и северо-северо-востока на юг и юго-юго-запад [7, 9]. Пик



коллизийных событий в породах орогенного ядра, произошедших за счет преимущественного палеопротерозойского ювенильного материала, т. е. в Лапландском гранулитовом поясе, Умбинском гранулитовом и Терском террейнах, был достигнут 1.92–1.93 млрд лет назад [2, 25]. Затем в Кольском регионе последовала быстрая эксгумация пород ядра и их быстрое остывание до  $T \approx 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  1.89–1.90 млрд лет назад (скорость остывания 5–7  $^{\circ}\text{C}$  млн лет<sup>-1</sup> [2]). Остывание пород Беломорской провинции, т. е. юго-западного форланда Лапландско-Кольского орогена, происходило в два раза медленнее – со скоростью 2–4  $^{\circ}\text{C}$  млн лет<sup>-1</sup> [2, 26]. В Печенга–Имандра-Варзугском поясе и в Кейвском террейне, т. е. к северу от орогенного ядра, надвиговые движения происходили с юга на север и с юго-юго-запада к северо-северо-востоку [13, 27, 28]. В Стрельнинском террейне, входящем в состав орогенного ядра, также установлены надвиговые движения в северо-восточном направлении [29]. В итоге главной чертой строения Лапландско-Кольского орогена является его общая пальмовидная морфология, при этом главный коллизийный шов проходит по южной границе Печенга–Имандра-Варзугского пояса [5–7]. Тектонический шов, ограничивающий снизу Лапландский гранулитовый пояс и Умбинский гранулитовый и Терский террейны, является компонентом главного коллизийного шва, а не самостоятельной сутурой, как предполагалось ранее [2, 9].

Палеопротерозойская лапландско-кольская коллизийная орогенция привела к значительному увеличению мощности континентальной коры Беломорья. Об этом свидетельствуют величины давления при гранулитовом метаморфизме в основании Лапландского гранулитового пояса, достигающие 13 кбар, тогда горячие лапландские гранулиты были надвинуты на относительно холодные архейские гранитоиды Беломорья [7, 20]. В последних величина давления во время их повторного метаморфизма должна была превышать приведенную выше при меньшей температуре. Это объясняет развитие участков с эклогитовыми парагенезисами в палеопротерозойских дайках лерцолит-габброноритового комплекса Беломорья [30]. Таким образом, повторный палеопротерозойский эклогитовый метаморфизм в нижней части беломорской континентальной коры [31] был вызван лапландско-кольской коллизийной орогенцией [32].

### **Свекофеннский аккреционный ороген**

Свекофеннский ороген, в отличие от Лапландско-Кольского, известен давно и очень хорошо изучен. Он представляет собой умереннобарическую и в целом высокотемпературную метаморфическую провинцию, в которой местами отмечен зональный метаморфизм от гранулитовой фации до низкотемпературной амфиболитовой фации [33–36]. Свекофенскому орогенезу предшествовало образование океанической коры 1.95 млрд лет назад (ее реликты представлены офиолитами Оутокумпу и Йормуа [37]). Во время субдукции океанической коры к северо-востоку под архейский Карельский кратон в течение примерно 100 млн лет происходило образование островных дуг за счет палеопротерозойского ювенильного материала. Последовательная аккреция разновозрастных островных дуг к Карельскому кратону сопровождалась метаморфизмом, развитием складчатости и разломов, а также гранитоидным магматизмом. Аккреция шла в три этапа, что определило комплексный характер свекофеннской аккреционной орогенции. Были выделены три орогенции, сменяющие друг друга во времени и пространстве: саво-лапландская (1.92–1.89 млрд лет), феннийская (1.87–1.84 млрд лет) и свекобалтийская (1.83–1.80 млрд лет [35]). В результате последовательного смещения зоны субдукции в юго-западном направлении глубинное строение земной коры Свекофеннского орогена приобрело асимметричность, обусловленную преобладанием геолого-геофизических разделов (границ), которые (суб)параллельны плоскостям субдукции и падают к северо-востоку [38]. Вблизи с границей с Карельским кратоном эти границы падают к северо-востоку только в мантии, непосредственно подстилающей земную кору. В земной же коре они падают к юго-западу, что обусловлено обдукцией океанической коры на Карельский кратон в северо-восточном направлении. В целом палеопротерозойский Свекофеннский ороген подобен современным аккреционным орогенам.

### Корреляция коллизионных событий в орогенах

Анализ коллизионных событий в Лапландско-Кольском коллизионном и Свекофенском аккреционном орогенах выявил пространственно-временную последовательность формирования Балтийского щита. Коллизия на щите началась с проявления альпинотипной тектоники на крайнем северо-востоке щита [27, 39] 1.97 млрд лет назад ([2] и ссылки там). Рубеж 1.97 млрд лет отвечает самому раннему эпизоду метаморфизма и деформации пород, который завершился 1.93 млрд лет назад ([2] и ссылки там). Именно к этому рубежу приурочены первые тоналит-трондьемит-гранодиоритовые породы (включая вулканиты) и диориты в ядре Лапландско-Кольского орогена [2, 9, 18], знаменующие начало субдукции океанической коры Лапландско-Кольского (Кольского) палеоокеана, которая существовала между кольской и беломорской континентальными массами архея. Затем коллизионные события сместились к юго-западу от Кейвского террейна в ядро Лапландско-Кольского орогена, в котором субдукция сменилась межконтинентальной коллизией 1.93–1.95 млрд лет назад. Таким образом, до начала главного в Лапландско-Кольском орогене этапа межконтинентальной коллизии верхняя и средняя кора Кейвского террейна была сорвана с архейского фундамента [27, 39]. После начала этого этапа глубинные надвиги стали развиваться в нижней коре ядра Лапландско-Кольского орогена (лапландские гранулиты и их аналоги) и прилегающей с юга части Беломорской провинции в условиях пика метаморфизма 1.92–1.93 млрд лет назад [2, 9, 20, 25]. Далее коллизионные события сдвинулись на самый юго-западный край Лапландско-Кольского орогена, т. е. на границу Беломорской провинции и Карельского кратона, где пик метаморфизма достигнут 1.89–1.91 млрд лет назад [40].

Одновременно с окончанием лапландско-кольской коллизионной орогении на северо-восточной окраине Карельского кратона на его противоположной, юго-западной окраине начались главные свекофенские аккреционные события. Аккреция свекофенских островодужных террейнов сопровождалась развитием надвигов, которые мигрировали дальше к юго-западу и западу и при этом омолаживались (саво-лапландская орогения вдоль юго-западной границы Карельского кратона 1.92–1.89 млрд лет назад, далее феннийская орогения 1.89–1.85 млрд лет назад и свекобалтийская орогения в самой южной и западной частях Свекофенского орогена 1.83–1.80 млрд лет назад [5]). Смещение во времени и пространстве (с северо-востока к юго-западу) свекофенских аккреционных событий было подтверждено и в Приладожье [36].

### Заключение

Таким образом, более ранняя лапландско-кольская коллизионная орогения и более поздняя свекофенская аккреционная орогения отражают латеральный рост Балтийского щита как фрагмента палеопротерозойского суперконтинента Нуна (Колумбия, Нена) в период примерно с 2.0 до 1.8 млрд лет. Это рост зафиксирован миграцией коллизии с северо-востока к юго-западу через весь щит. Аналогичное смещение во времени и пространстве орогенных событий в том же направлении отмечается и во всем Северо-Атлантическом регионе [16].

Увеличение размеров континента связывают с орогией тюркского типа, первые проявления которой имели место уже в архее [41]. Особенность орогении тюркского типа состоит в том, что доколлизийная история двух сталкивающихся континентов включает рост очень крупных субдукционных и аккреционных комплексов, миграцию магматических (островных) дуг и разрастание континента, к которому все они присоединяются. Таким образом, последовательное проявление палеопротерозойских лапландско-кольской и свекофенской орогений и миграции коллизионных событий, которым предшествовала миграция магматических дуг, можно выделить как лапландско-свекофенскую орогению тюркского типа, в результате которой сформировался Балтийский щит. Материалы и корреляции, рассмотренные и сделанные в работе [16], позволяют предполагать, что палеопротерозойские орогении тюркского типа

проявились во всем Северо-Атлантическом регионе и привели к образованию значительной части суперконтинента Нуна.

### Благодарности

Многие идеи, касающиеся строения и развития палеопротерозойского Лапландско-Кольского коллизионного орогена, были высказаны Дэвидом Бриджуотером, Дж. Стивенсом Дэйли и Мартином Я. Тиммерманом [1, 2] и развиты при участии первого автора статьи в ходе подготовке и выполнении проекта «СВЕКАЛАПКО».

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Bridgwater D., Marker M., Mengel F.* The eastern extension of the early Proterozoic Torngat Orogenic Zone across the Atlantic // LITHOPROBE Report 27. 1992. P. 76–91.
2. The Lapland-Kola Orogen: Palaeoproterozoic collision and accretion of the northern Fennoscandian lithosphere / *J. S. Daly [et al.]* // European Lithosphere Dynamics. Geological Society London, Memoirs, 2006. Vol. 32. P. 579–598.
3. *Прияткина Л. А., Шарков Е. В.* Геология Лапландского глубинного разлома (Балтийский щит). Л.: Наука, 1979. 128 с.
4. Petrogenesis and evolution of an early Proterozoic collisional orogenic belt: The granulite belt of Lapland and the Belomorides (Fennoscandia) / *P. Barbey [et al.]* // Geological Society of Finland, Bulletin. 1984. Vol. 56, parts 1–2. P. 161–188.
5. *Berthelsen A., Marker M.* Tectonics of the Kola collision suture and adjacent Archaean and early Proterozoic terrains in the northeastern region of the Baltic Shield // Tectonophysics. 1986. Vol. 126. P. 31–55.
6. *Melezhik V. A., Sturt B. A.* General geology and evolutionary history of the early Proterozoic Polmak-Pasvik-Pechenga-Imandra/Varzuga-Ust'-Ponoy Greenstone Belt in the northeastern Baltic Shield // Earth-Science Reviews. 1994. Vol. 36. P. 205–241.
7. Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: палеогеодинамика, строение и эволюция континентальной коры / *М. В. Минц [и др.]*. М.: Научный мир, 1996. 287 с. (Тр. ГИН РАН. Вып. 503).
8. Ion microprobe U-Pb zircon geochronology and isotopic evidence supporting a trans-crustal suture in the Lapland Kola Orogen, northern Fennoscandian Shield / *J. S. Daly [et al.]* // Precambrian Research. 2001. Vol. 105, No. 2–4. P. 289–314.
9. *Балаганский В. В., Глебовицкий В. А.* Лапландский гранулитовый пояс и комплементарные структуры // Ранний докембрий Балтийского щита. СПб.: Наука, 2005. С. 124–175.
10. Кольский глубинный раннедокембрийский коллизион: новые данные по геологии, геохронологии, геодинамике и металлогении / *Ф. П. Митрофанов [и др.]* // Вестник СПбГУ. 1997. Сер. 7, вып. 3. С. 5–18.
11. *Иванов А. А.* Состав, строение супракрустальных толщ и черты эволюции осадочно-вулканогенного породообразования архея Терского блока (Кольский полуостров): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Л., 1987. 17 с.
12. *Козлов Н. Е., Иванов А. А., Нерович Л. И.* Лапландский гранулитовый пояс — первичная природа и развитие. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1990. 172 с.
13. *Barbey P., Bernard-Griffiths J., Convert J.* The Lapland charnockitic complex: REE geochemistry and petrogenesis // Lithos. 1986. Vol. 19, no. 2. P. 95–111.
14. *Tuisku P., Huhma H., Whitehouse M.* Geochronology and geochemistry of the enderbite series in the Lapland Granulite Belt: generation, tectonic setting, and correlation of the belt // Canadian Journal of Earth Sciences. 2012. Vol. 49. P. 1297–1315.
15. Some new aspects of geology, deep structure, geochemistry and geochronology of the Lapland Granulite Belt, Baltic Shield / *N. E. Kozlov [et al.]* // Nor. Geol. Unders. Special Publications. 1995. No. 7. P. 157–166.
16. FIRE seismic reflection profiles 4, 4A and 4B: Insights into Crustal Structure of Northern Finland from Ranua to Näätämö / *N. L. Patison [et al.]* // Finnish Reflection Experiment FIRE 2001–2005. Geological Survey of Finland, Special Paper 43. Espoo: Geologian tutkimuskeskus, 2006. P. 161–222.
17. *Meriläinen K.* The granulite complex and adjacent rocks in Lapland, Northern Finland // Geological Survey of Finland Bulletin. 1976. No. 281. 129 p.
18. *Лебедева Ю. М.* Метасоматические процессы при высоких температурах и давлениях в Лапландском гранулитовом поясе (на примере Порьегубского покрова): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб., 2015. 167 с.
19. Новые подходы к геологии и тектонике и их следствия для оценки металлогенического потенциала Кольского региона: заключительный отчет по теме 4–2012–2301 / *В. В. Балаганский [и др.]*. Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2012. 48 с.
20. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС / *М. В. Минц [и др.]*. Т. 2. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2010. 400 с.
21. *Eskola P.* On the granulites of Lapland // American Journal of Sciences. 1952. Bowen Volume. P. 133–171.
22. *Крылова М. Д., Прияткина Л. А.* Гиперстен-силлиманитовая ассоциация в гранулитовом комплексе Порьей губы // ДАН СССР. 1976. Т. 226, № 3. С. 661–664.
23. Структурно-петрологическое изучение ортопироксен-силлиманитовой ассоциации лапландских гранулитов / *Н. Е. Козлова [и др.]* // Известия АН СССР. Сер. геол. 1991. № 4. С. 66–76.
24. Фашии регионального метаморфизма Кольской полуострова / *О. А. Беляев [и др.]*. Л.: Наука, 1977. 88 с.
25. *Бибикова Е. В., Мельников В. Ф., Авакян К. Х.* Лапландские гранулиты: петрохимия, геохимия и изотопный возраст // Петрология. 1993. Т. 1, № 2. С. 215–234.
26. Titanite-rutile chronometry across the boundary between the Archaean Craton in Karelia and the Belomorian Mobile Belt, eastern Baltic Shield / *E. Bibikova [et al.]* // Precambrian Research. 2011. Vol. 105, no 2–4. P. 315–330.
27. Альпинотипная тектоника в палеопротерозойском Лапландско-Кольском орогене / *С. В. Мудрук [и др.]* // Геотектоника. 2013. № 4. С. 13–30.
28. Сейсмологическая модель литосферы Северной Европы: Лапландско-Печенгский район. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 226 с.
29. *Мудрук С. В., Балаганский В. В.* Структурный анализ серговской толщи палеопротерозоя юго-востока Кольского полуострова, Балтийский щит // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2009. Т. 12, № 3. С. 492–502.
30. *Травин В. В., Козлова Н. Е.* Локальные сдвиговые деформации как причина эклогитизации (на примере

структур Гридинской зоны меланжа, Беломорский подвижный пояс) // ДАН. 2005. Т. 405, № 3. С. 376–380. **31.** Archean eclogites and Paleoproterozoic eclogitized gabbroids, Gridino area, White Sea / A. I. Slabunov [et al.] // Karelian Craton transect (Finland, Russia): Precambrian greenstone belts, ophiolites and eclogites. Oslo: 33 IGC, The Nordic Countries, 2008. P. 36–53. **32.** Archaean Kuru-Vaara eclogites in the northern Belomorian Province, Fennoscandian Shield: Crustal architecture, timing, and tectonic implications / V. Balagansky [et al.] // International Geology Review. 2015. Vol. 57, no. 11–12. P. 1543–1565. **33.** The GGT/SVEKA transect: structure and evolution of the continental crust in the Paleoproterozoic Svecofennian Orogen in Finland / K. Korsman [et al.] // International Geology Review. 1999. Vol. 41. P. 287–333. **34.** Korja A., Lahtinen R., Nironen M. The Svecofennian orogen: a collage of microcontinents and island arcs // European Lithosphere Dynamics. Geological Society London, Memoirs. 2006. Vol. 32. P. 561–578. **35.** Lahtinen R., Garde A. A., Melezhik V. A. Paleoproterozoic evolution of Fennoscandia and Greenland // Episodes. 2008. Vol. 31, no 1. P. 20–28. **36.** Балтыбаев Ш. К. Свекофеннский ороген Фенноскандинавского щита: вещественно-изотопная зональность и ее тектоническая интерпретация // Геотектоника. 2013. № 6. С. 44–59. **37.** Peltonen P. Ophiolites // Precambrian Geology of Finland — Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield. Developments in Precambrian Geology, 14. Amsterdam: Elsevier, 2005. P. 237–278. **38.** Snyder D. B. Lithospheric growth at margins of cratons // Tectonophysics, 2002. Vol. 355, no. 1–4. P. 7–22. **39.** Балаганский В. В., Раевский А. Б., Мудрук С. В. Нижний докембрий Кейвского террейна, северо-восток Балтийского щита: стратиграфический разрез или коллаж тектонических пластин // Геотектоника. 2011. № 2. С. 32–48. **40.** Р-Т условия и возраст метаморфизма гранат-кианит-ставролит-двуслюдяных сланцев на границе архей — протерозой в Кукаозерской структуре, Северо-Карельская зона карелид, Балтийский щит / П. Я. Азимов [и др.] // Гранит-зеленокаменные системы архея и их поздние аналоги. Петрозаводск: ИГ КарНЦ РАН, 2009. С. 6–9. 16 с. **41.** Sengör A. M. C., Natal'in B. A. Turcic-type orogeny and its role in the making of the continental crust // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1996. Vol. 24. P. 263–337.

### Сведения об авторах

*Балаганский Виктор Валентинович* — доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией ФГБУН Геологического института КНЦ РАН; профессор ФГБОУ Мурманского государственного технического университета

E-mail: balagan@geoksc.apatity.ru

*Горбунов Илья Александрович* — младший научный сотрудник ФГБУН Геологического института КНЦ РАН

E-mail: gorbunov51@yandex.ru

*Мудрук Сергей Владимирович* — кандидат геолого-минералогических наук, ученый секретарь ФГБУН Геологического института КНЦ РАН; доцент ФГБОУ Мурманского государственного технического университета

E-mail: mudruksergey@mail.ru

### Author Affiliation

*Victor V. Balagansky* — Dr. Sci. (Geology & Mineralogy), Head of Laboratory of the Geological Institute of the KSC of the RAS, Professor at the Murmansk State Technical University

E-mail: balagan@geoksc.apatity.ru

*Il'ya A. Gorbunov* — Junior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: gorbunov51@yandex.ru

*Sergey V. Mudruk* — PhD (Geology & Mineralogy), Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS; Associate Professor at the Murmansk State Technical University

E-mail: mudruksergey@mail.ru

### Библиографическое описание статьи

*Балаганский, В. В.* Палеопротерозойские Лапландско-Кольский и Свекофеннский орогены (Балтийский щит) / В. В. Балаганский, И. А. Горбунов, С. В. Мудрук // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 3(26). — С. 5–11.

### Reference

*Balagansky Victor V., Gorbunov Il'ya A., Mudruk Sergey V.* Palaeoproterozoic Lapland-Kola and Svecofennian Orogens (Baltic Shield). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 3(26), pp. 5–11. (In Russ.).

УДК 548.12/15

## СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОМБИНАЦИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОСТЫХ ФОРМ

**Ю. Л. Войтеховский, Д. Г. Степенщиков**  
ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

### Аннотация

Для всех 30 закрытых простых форм впервые решена задача Ж. Б. Л. Роме-де-Лиля о вершинных и реберных усечениях выпуклого кристаллического полиэдра. Полученные комбинации простых форм предложено рассматривать как специальные. Установлено, что в каждом классе симметрии простые формы допускают полные вершинное и реберное усечения закрытой простой формы. Дуальные формы можно видеть на природных кристаллах флюорита и алмаза (октаэдр vs. куб), топаза (ромбическая призма + пинакоид vs. ромбическая бипирамида) и т. д. Результаты показывают, что задачи теоретической и прикладной кристалломорфологии далеко не исчерпаны. Статья посвящена 280-летию со дня рождения Ж. Б. Л. Роме-де-Лиля (1736–1790), одного из основателей кристаллографии.

### Ключевые слова:

*кристаллический класс симметрии, закрытая простая форма, выпуклый дуальный полиэдр, вершинное и реберное усечение, специальные комбинации простых форм, задача Ж. Б. Л. Роме-де-Лиля.*

## SPECIAL COMBINATIONS OF CRYSTALLINE SIMPLE FORMS

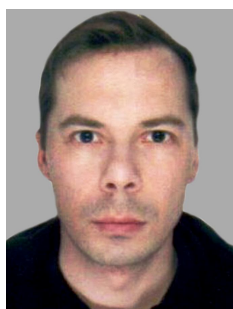
**Yury L. Voytekhovsky, Dmitry G. Stepenshchikov**  
Geological Institute of the KSC of the RAS

### Abstract

For the first time, the J. B. L. Rome de Lisle's problem on the vertex and edge truncations of a convex crystalline polyhedron, has been solved for all 30 closed simple forms. The obtained combinations of simple forms are suggested to consider as special ones. For any symmetry class, the simple forms are found to allow their full vertex and edge truncations with a closed simple form. The dual forms can be seen on the natural crystals of fluorite and diamond (octahedron vs. cube), topaz (rhombic prism + pinacoid vs. rhombic bipyramid), etc. These results show that the problems of both theoretical and applied crystal morphology are not exhausted at all. The paper is devoted to the 280<sup>th</sup> anniversary of J. B. L. Rome de Lisle (1736–1790), one of the founders of crystallography.

### Keywords:

crystalline symmetry class, closed simple form, convex dual polyhedron, vertex and edge truncation, special combinations of simple forms, J. B. L. Rome de Lisle's problem.



### Введение

В каждом из 32 классов симметрии разрешен определенный набор кристаллических простых форм. Они получаются размножением плоскостей частного и общего положения элементами соответствующей точечной группы симметрии. Далее теория допускает любые их комбинации. Что известно о них? Геометрическая кристалломорфология сообщает нам универсальные правила Х. С. Вейса (каждая грань кристалла принадлежит как минимум двум зонам — совокупностям граней, пересекающихся по параллельным ребрам) и В. М. Гольдшмидта (границы одной зоны образуются последовательным притуплением ребер

по правилу компликации — согласно числовым рядам Брокочи). Физическая кристалломорфология добавляет правила Е. С. Фёдорова (преобладают грани с наибольшей ретикулярной плотностью) и Г. В. Вульфа (преобладают грани с наименьшей скоростью роста). Авторы утверждают, что вопрос о комбинациях кристаллических простых форм далеко не исчерпан. Статья посвящена 280-летию со дня рождения Ж. Б. Л. Роме-де-Лиля (1736–1790), одного из основателей кристаллографии.

### Комбинации простых форм как алгебраическая структура

Содержат ли комбинации простых форм другие смыслы? Например, какая алгебраическая система при этом реализуется? По аналогии с тем, что в структурах кристаллов реализованы 230 пространственных, а в их огранке — 32 точечные группы симметрии, что вторые суть фактор-группы от первых по подгруппам трансляций и т. д. Этот аспект теории до сих пор не обсуждался, кроме работы одного из авторов [1]. Пусть  $A_i, A_j, A_k \dots$  — простые формы одного класса симметрии;  $i, j, k \dots = 1, \dots, n$ ; где  $n$  — число простых форм в классе. Обозначим их комбинацию  $A_i \times A_j \times A_k \times \dots$ . Операцию  $\times$  естественно назвать умножением. Определим полную совокупность комбинаций простых форм в классе:  $\Sigma = \{A_i \times A_j \times A_k \times \dots : \forall i, j, k \dots = 1, \dots, n\}$ . Каковы ее свойства?

Будем считать комбинацию  $A_i \times A_j \times A_k \times \dots$  однозначно определенной набором входящих простых форм без морфологических и генетических смыслов: относительных площадей граней простых форм, последовательности их образования на кристалле и т. д. Тем самым определено, что  $\Sigma$  — группоид. При этом имеет место ассоциативность операции  $\times$ :  $(A_i \times A_j) \times A_k = A_i \times (A_j \times A_k)$ , т. е.  $\Sigma$  — полугруппа.

Очевидно,  $A_i \times A_j = A_j \times A_i$  для любых  $i, j$ , т. е.  $\Sigma$  — коммутативная полугруппа. Из  $A_i \times A_j = A_i \times A_k$  следует  $A_j = A_k$ . Аналогично: из  $A_i \times A_k = A_j \times A_k$  следует  $A_i = A_j$  — имеют место левое и правое сокращения, т. е.  $\Sigma$  — полугруппа с двусторонним сокращением.

Для любой простой формы выполнено  $A_i \times A_i = A_i$  — такие элементы в алгебраических системах называются идемпотентами. Каждый элемент полугруппы  $\Sigma$  идемпотентен. По сути, это означает, что каждая простая форма присутствует на кристалле в одном экземпляре.

Особую роль в  $\Sigma$  играет полная комбинация простых форм данного класса  $\Pi = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$ . Для любой простой формы  $A_k$  выполнено:  $A_k \times \Pi = \Pi \times A_k = \Pi$ , т. е.  $\Pi$  — двусторонний 0 полугруппы  $\Sigma$ , а каждый ее элемент — двусторонняя 1 для  $\Pi$ .

Любое подмножество простых форм из полной совокупности  $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  порождает полугруппу  $\Sigma^\circ$ , являющуюся подполугруппой для  $\Sigma$ . В полугруппе  $\Sigma^\circ$  есть свой двусторонний 0 — полная комбинация образующих ее простых форм —  $\Pi^\circ$ . Каждый элемент из  $\Sigma^\circ$  — двусторонняя 1 для  $\Pi^\circ$ . Но в полугруппе  $\Sigma$  нет 1 (такой простой формы, комбинация которой с любой другой ничего к последней не добавляет), которую для полноты системы можно доопределить внешним образом.

Итак, полная совокупность комбинаций простых форм каждого класса симметрии образует коммутативную полугруппу, каждый элемент которой идемпотентен, с двусторонним сокращением и 0, а также внешне присоединенной 1. Эти свойства приводят к содержательному результату ввиду теоремы: всякая коммутативная полугруппа идемпотентов изоморфна некоторой полугруппе, элементами которой являются подмножества некоторого множества, а действием — операция пересечения [2]. Искомую полугруппу, изоморфную полугруппе  $\Sigma$ , образуют ее подмножества  $R_X$  всех элементов, делящихся на  $X$ , т. е. всех комбинаций простых форм, содержащих форму  $X$ .

Полугруппы этого вида играют в алгебре особую роль ввиду их связи с понятием частичной упорядоченности и теоремы: для каждой коммутативной полугруппы идемпотентов существует единственная сопряженная с ней полуструктура. Нужен более глубокий анализ выявленной фундаментальной полугруппы и сопряженной полуструктуры применительно к объектам минералогической кристаллографии. Выявленная коммутативная полугруппа

идемпотентов дана нам в комбинациях простых форм на природных кристаллах, что говорит о ее естественном характере.

### Задача Роме-де-Лиля для закрытых простых форм

Кристаллический полиэдр сегодня рассматривают с точки зрения взаимного расположения граней (полиэдр — многогранник), что исторически обусловлено неоднократно открывавшимся законом постоянства плоских углов на ребрах кристалла и гониометрической техникой их измерений. Но так было не всегда. А. Г. Вернер различал кристаллы по вершинам [3], а Ж. Б. Л. Роме-де-Лиль в 1783 г. в труде «La cristallographie...» отдал должное всем элементам: «Какой-либо кристалл может быть усеченным в своих вершинах, а также вдоль ребер. <...> Наблюдаются кристаллы, часть которых имеет усечения или на вершинах, или даже и на вершинах, и на ребрах» [4, с. 13]. К сожалению, оригинальные труды Ж. Б. Л. Роме-де-Лиля не удалось найти даже в богатой личной библиотеке А. Е. Ферсмана в Кольском научном центре РАН, и мы пользуемся переводами И. И. Шафрановского. В приведенном рассуждении вполне просматривается «задача Роме-де-Лиля»: для данного кристаллического полиэдра найти формы, получающиеся усечением вершин или ребер, в самом сложном варианте — тех и других одновременно. Для определенности исходных условий далее она решена для 30 закрытых (полиэдрических) простых форм (з. п. ф.). При этом эквивалентные (переводимые друг в друга преобразованиями симметрии) вершины и ребра усекаются одинаково — секущая плоскость ориентирована одинаково относительно эквивалентных граней, сходящихся в вершине или на ребре.

Легко видеть, что вершинные усечения приводят к геометрически дуальным формам. Для этого вершины следует усекать настолько глубоко, чтобы с поверхности полиэдра исчезли грани исходной формы. Дуальные полиэдры хорошо известны в минералогии: октаэдр дуален кубу на кристаллах флюорита и алмаза, комбинация призмы и пинакоида дуальна одноименной бипирамиде на кристаллах топаза и апатита (рис. 1) и т. д. Эти наблюдения обнаруживают в задаче Роме-де-Лиля реальную, диктуемую природой подоплеку. Одновременно эта часть задачи допускает иную, совершенно нетривиальную формулировку: в каждом ли классе симметрии допустима форма, геометрически дуальная исходной з. п. ф.?



Рис. 1. Флюорит (слева, Намибия) и топаз (справа, Урал) — примеры дуальных простых форм и их комбинаций на одном кристалле: куб vs. октаэдр (слева); ромбическая бипирамида vs. комбинация ромбической призмы и пинакоида [[http://geo.web.ru/druza/L-Dalneger\\_M.htm](http://geo.web.ru/druza/L-Dalneger_M.htm); [http://geo.web.ru/druza/m-flu\\_33-pg138.htm](http://geo.web.ru/druza/m-flu_33-pg138.htm)]

Заметим, что об усечении (притуплении) ребер кристаллического полиэдра говорится в правиле complication В. М. Гольдшмидта (1853–1933) [5, 6]. Но в нем не говорится об усечении вершин. Усечения вершин (операция  $\alpha$ ) и ребер (операция  $\beta$ ) предусмотрел Е. С. Фёдоров (1853–1919) в своем алгоритме генерирования полного комбинаторного многообразия выпуклых полиэдров из тетраэдра [7–10]. Но они применимы лишь к простым (в каждой вершине сходятся ровно три грани / ребра) полиэдрам. В такой постановке усечением

вершин куба можно получить дуальный ему октаэдр, но операция оказывается необратимой, октаэдр — тупиковой формой. Таким образом, в максимальной полноте задача об усечениях кристаллического полиэдра по вершинам и ребрам, хотя и неявно, содержится именно в работе «La cristallographie...» Ж. Б. Л. Роме-де-Лиля.

### Результаты

Для решения задачи составлены оригинальные компьютерные алгоритмы, позволяющие строить вершинные и реберные усечения любой з. п. ф., распознавать простые формы (их оказалось не более трех) в полученных комбинациях, изображать их отдельно и в любых парных сочетаниях, причем в разных вариантах — с видимыми задними ребрами и без них, с вращением форм в 3D и выбором желаемой проекции. Результаты сведены в табл. 1, 2 и на рис. 2.

При их рассмотрении следует иметь в виду различия кристаллографического и геометрического восприятия полиэдрических форм. Так, кристаллограф знает три различных по симметрии тетраэдра — простые формы: ромбический, тетрагональный и кубический. Все прочие «тетраэдры» суть комбинации, например, моноэдров (плоскостей). Октаэдр в разных классах симметрии может быть истинным ( $m\bar{3}$ ,  $432$ ,  $m\bar{3}m$ ), а может лишь казаться таковым, будучи, по сути, композицией двух тетраэдров ( $23$ ,  $\bar{4}3m$ ) в том смысле, что грани октаэдра, взятые через одну и продолженные до замыкания, образуют два тетраэдра, в пересечении дающие исходный октаэдр. Призмы в кристаллографии не имеют оснований и как открытые простые формы отсутствуют в левых колонках табл. 1 и 2.

Обратим внимание на то, что в таблицах отсутствуют триклинная и моноклиновая сингонии — в них вообще нет з. п. ф. Кристаллические полиэдры этих сингоний образованы комбинациями простых форм. Но исходное условие решаемой далее задачи — именно закрытая (полиэдрическая) простая форма. В связи с возможным обобщением задачи особый интерес вызывает примитивный класс симметрии триклинной сингонии (точечная группа симметрии 1), в котором разрешена лишь одна простая форма — моноэдр. Несмотря на кажущийся минимум возможностей, подходящей комбинацией моноэдров можно образовать выпуклый полиэдр любого комбинаторного типа. В этом смысле именно через примитивный класс симметрии триклинной сингонии кристалломорфология сообщается с комбинаторно-геометрической теорией выпуклых полиэдров.

Таблица 1

Вершинные усечения з. п. ф.

№	Исходная з. п. ф.	Вершинное усечение
1	2	3
Ромбическая сингония		
1	Тетраэдр ромб. (4)	Тетраэдр ромб.
2	Бипирамида ромб. (2 + 2 + 2)	3 пинакоида
Тригональная и гексагональная сингонии		
3	Бипирамида триг. (3 + 2)	Призма триг. + пинакоид
4	Ромбоэдр (6 + 2)	Ромбоэдр + пинакоид (триг. антипризма)
5	Трапецоэдр триг. (6 + 2)	Трапецоэдр триг. + пинакоид
6	Бипирамида дитриг. (6 + 2)	Призма дитриг. + пинакоид
7	Скаленоэдр дитриг. (6 + 2)	Ромбоэдр + пинакоид (усеченная триг. антипризма, грани — трапеции)
8	Трапецоэдр гекс. (12 + 2)	Трапецоэдр гекс. + пинакоид
9	Бипирамида гекс. (6 + 2)	Призма гекс. + пинакоид
10	Бипирамида дигекс. (12 + 2)	Призма дигекс. + пинакоид



1	2	3
Тетрагональная сингония		
11	Тетраэдр тетр. (4)	Тетраэдр тетр.
12	Бипирамида тетр. (4 + 2)	Призма тетр. + пинакоид
13	Скаленоэдр тетр. (4 + 2)	Тетраэдр тетр. + пинакоид
14	Трапезоэдр тетр. (8 + 2)	Трапезоэдр тетр. + пинакоид
15	Бипирамида дитетр. (8 + 2)	Призма дитетр. + пинакоид
Кубическая сингония		
16	Тетраэдр куб. (4)	Тетраэдр куб.
17	Октаэдр (6)	Куб
18	Куб (8)	Октаэдр ( $m\bar{3}$ , $432$ , $m\bar{3}m$ ) или 2 тетраэдра ( $23, \bar{4}3m$ )
19	Ромбододекаэдр (8 + 6)	Октаэдр ( $m\bar{3}$ , $432$ , $m\bar{3}m$ ) или 2 тетраэдра ( $23, \bar{4}3m$ ) (архимедов кубооктаэдр) + куб
20	Пентагондододекаэдр (12 + 8)	Пентагондододекаэдр + октаэдр ( $m\bar{3}$ ) или 2 тетраэдра (23) («икосаэдр» на кристаллах пирита)
21	Тригонритетраэдр (4 + 4)	2 тетраэдра (усеченный тетраэдр)
22	Тетрагонритетраэдр (6 + 4 + 4)	Куб + 2 тетраэдра (тетраэдр, усеченный по ребрам и вершинам, грани — тригоны)
23	Пентагонритетраэдр (12 + 4 + 4)	Пентагонритетраэдр + 2 тетраэдра
24	Гексатетраэдр (6 + 4 + 4)	Куб + 2 тетраэдра (тетраэдр, усеченный по ребрам и вершинам, грани — гексагоны)
25	Тригонтриоктаэдр (8 + 6)	Октаэдр + куб (усеченный куб)
26	Тетрагонтриоктаэдр (12 + 8 + 6)	Ромбододекаэдр + октаэдр + куб (грани октаэдра — тригоны, остальные — тетрагоны)
27	Пентагонтриоктаэдр (24 + 8 + 6)	Пентагонтриоктаэдр + октаэдр + куб
28	Тетрагексаэдр (8 + 6)	Октаэдр ( $432$ , $m\bar{3}m$ ) или 2 тетраэдра ( $\bar{4}3m$ ) + куб (усеченный октаэдр)
29	Дидодекаэдр (12 + 8 + 6)	Пентагондододекаэдр + октаэдр + куб
30	Гексоктаэдр (12 + 8 + 6)	Ромбододекаэдр + октаэдр + куб (грани ромбододекаэдра — тетрагоны, октаэдра — гексагоны, куба — октагоны)

*Примечание.* После названия исходной з. п. ф. в скобках даны числа эквивалентных вершин на ней. Сокращения: ромб. — ромбический, триг. — тригональный, дитриг. — дитригональный, гекс. — гексагональный, тетр. — тетрагональный, дитетр. — дитетрагональный, куб. — кубический. Номера соответствуют табл. 2 и рис. 2.

## Реберные усечения з. п. ф.

№	Исходная з. п. ф.	Реберное усечение
Ромбическая сингония		
1	Тетраэдр ромб. (2 + 2 + 2)	3 пинакоида
2	Бипирамида ромб. (4 + 4 + 4)	3 призмы ромб.
Тригональная и гексагональная сингонии		
3	Бипирамида триг. (6 + 3)	Бипирамида триг. + призма триг.
4	Ромбоэдр (6 + 6)	Ромбоэдр + призма гекс.
5	Трапецоэдр триг. (6 + 3 + 3)	Трапецоэдр триг. + 2 призмы триг.
6	Бипирамида дитриг. (6 + 6 + 6)	Призма дитриг. + 2 бипирамиды триг.
7	Скаленоэдр дитриг. (6 + 6 + 6)	2 ромбоэдра + призма гекс.
8	Трапецоэдр гекс. (12 + 6 + 6)	Трапецоэдр гекс. + 2 призмы гекс.
9	Бипирамида гекс. (12 + 6)	Бипирамида гекс. + призма гекс.
10	Бипирамида дигекс. (12 + 12 + 12)	2 бипирамиды гекс. + призма дигекс.
Тетрагональная сингония		
11	Тетраэдр тетр. (4 + 2)	Призма тетр. + пинакоид
12	Бипирамида тетр. (8 + 4)	Бипирамида тетр. + призма тетр.
13	Скаленоэдр тетр. (4 + 4 + 4)	Призма тетр. + 2 тетраэдра тетр.
14	Трапецоэдр тетр. (8 + 4 + 4)	Трапецоэдр тетр. + 2 призмы тетр.
15	Бипирамида дитетр. (8 + 8 + 8)	Призма дитетр. + 2 бипирамиды тетр.
Кубическая сингония		
16	Тетраэдр куб. (6)	Куб
17	Октаэдр (12)	Ромбододекаэдр
18	Куб (12)	Ромбододекаэдр
19	Ромбододекаэдр (24)	Тетрагонтриоктаэдр
20	Пентагондододекаэдр (24 + 6)	Дидодекаэдр + куб
21	Тригонритетраэдр (12 + 6)	Тетрагонритетраэдр + куб
22	Тетрагонритетраэдр (12 + 12)	2 тригонритетраэдра
23	Пентагонритетраэдр (12 + 12 + 6)	2 пентагонритетраэдра + куб
24	Гексатетраэдр (12 + 12 + 12)	2 тригонритетраэдра + тетрагонритетраэдр
25	Тригонтриоктаэдр (24 + 12)	Тетрагонтриоктаэдр + ромбододекаэдр
26	Тетрагонтриоктаэдр (24 + 24)	Тригонтриоктаэдр + тетрагексаэдр
27	Пентагонтриоктаэдр (24 + 24 + 12)	2 пентагонтриоктаэдра + ромбододекаэдр
28	Тетрагексаэдр (24 + 12)	Тетрагонтриоктаэдр + ромбододекаэдр
29	Дидодекаэдр (24 + 12 + 12)	Дидодекаэдр + 2 пентагондододекаэдра
30	Гексоктаэдр (24 + 24 + 24)	Тригонтриоктаэдр + тетрагонтриоктаэдр + тетрагексаэдр

*Примечание.* После названия исходной з. п. ф. в скобках даны числа эквивалентных ребер на ней. Сокращения см. в табл. 1. Номера соответствуют табл. 1 и рис. 2.

Специальные комбинации кристаллических простых форм

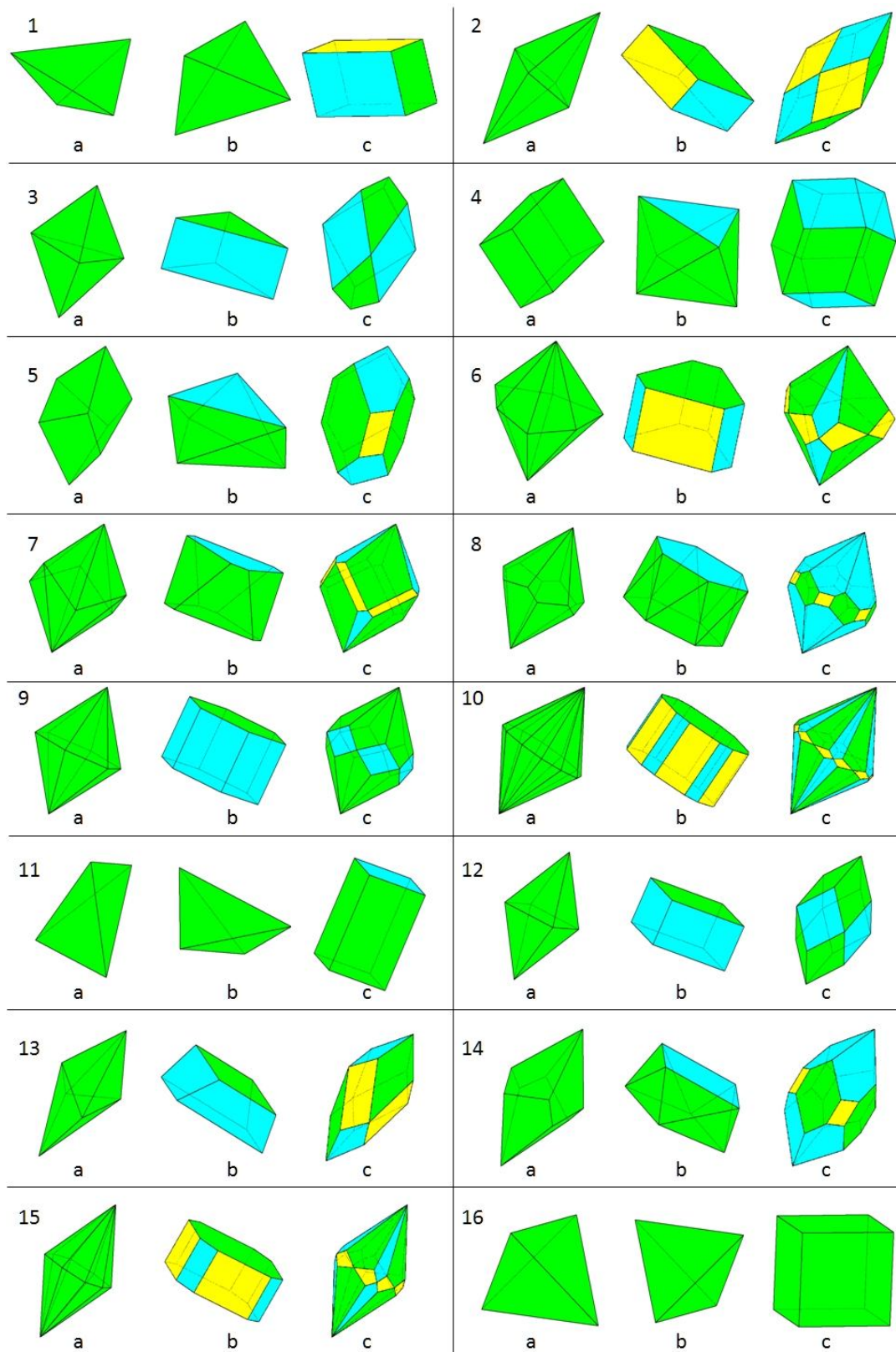


Рис. 2. Усечения з. п. ф.: *a* — исходная; *b* — вершинное усечение; *c* — реберное усечение. Разным цветом показаны разные простые формы. Номера соответствуют табл. 1, 2 (начало)

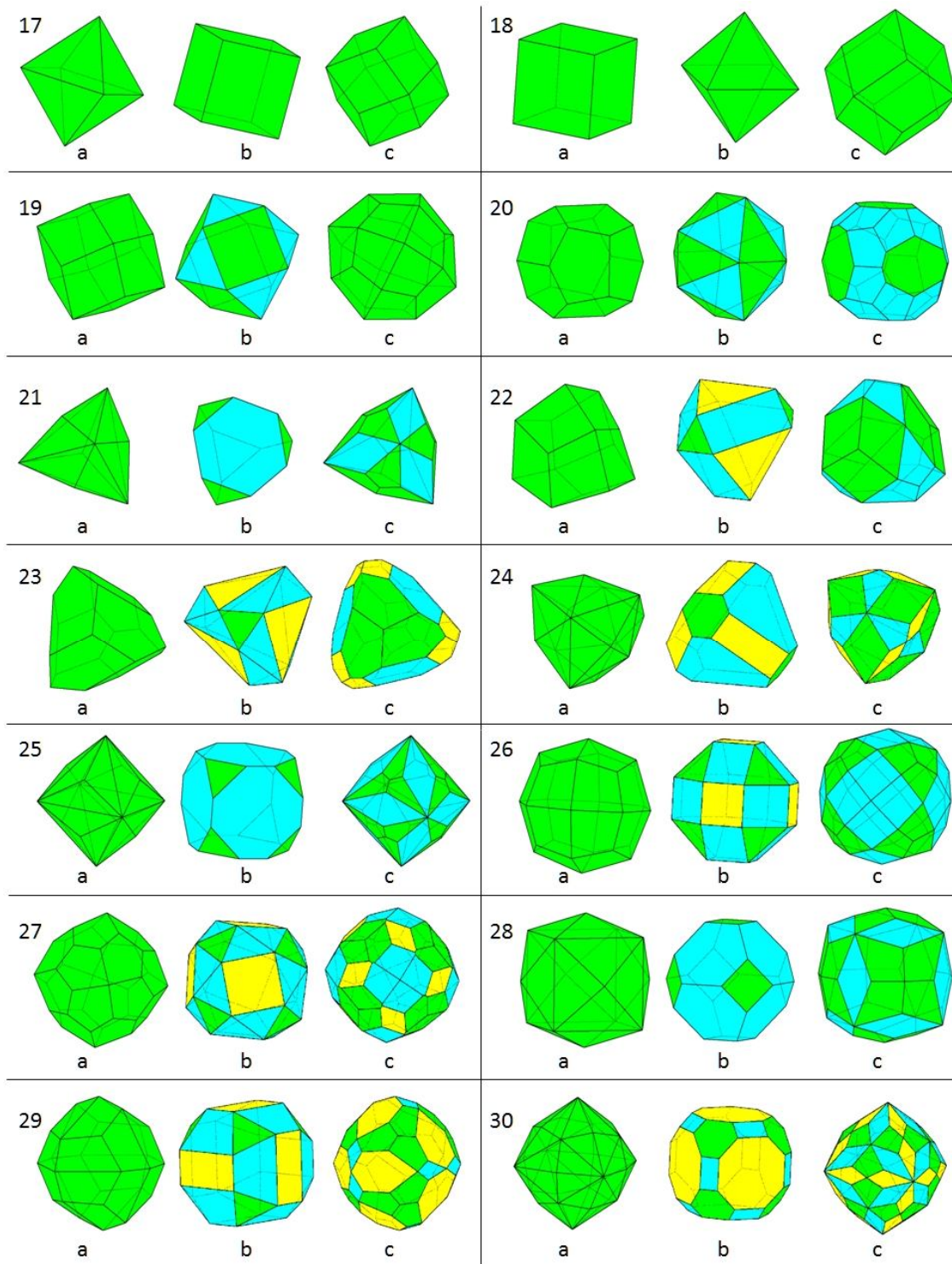


Рис. 2. Усечения з. п. ф. (окончание)

### Обсуждение результатов

Анализ табл. 1, 2 и рис. 2 показал следующее. Разрешенные в каждом классе симметрии простые формы позволяют построить полные вершинное или реберное усечения для любой з. п. ф. Соответствующие комбинации простых форм предлагается выделить как особые. Результат представляется интересным, поскольку геометрическая кристалломорфология ничего

не говорит об особых комбинациях простых форм в том или ином классе симметрии, положив, что для каждого минерала в реальных условиях их определяют физические законы.

Для вершинных усечений найдено, что все классы симметрии допускают геометрическую форму, дуальную исходной закрытой простой форме. В классах  $23$  и  $\bar{4}3m$  кубу дуальна комбинация двух тетраэдров — гемиздрических форм октаэдра. К сожалению, тема голо-, геми-, тетарто- и огдоэдри, связывавшая родственные простые формы в ряды, незаметно исчезла из кристалломорфологии.

Между закрытыми простыми формами обнаружены новые связи. Так, в тригональной сингонии ромбоэдр и дитригональный скаленоэдр имеют в качестве дуальных различные комбинации ромбоэдра и пинакоида. Для первого она выглядит как тригональная антипризма. Для второго — она же, срезанная параллельно пинакоиду так, что треугольные грани стали трапециями. В кубической сингонии ромбододекаэдр, тетрагонритетраэдр, гексатетраэдр, тригонтриоктаэдр и тетрагексаэдр имеют в качестве дуальных форм различные комбинации куба и октаэдра (или двух тетраэдров). Тетрагонтриоктаэдр и гексоктаэдр имеют в качестве дуальных различные комбинации ромбододекаэдра, октаэдра и куба. Отличия состоят в разном развитии простых форм. Одна комбинация получается из другой движениями граней вдоль нормалей. Им соответствуют повороты граней исходных з. п. ф. на ребрах. Так, грани дитригонального скаленоэдра, попарно сливаясь в параллельном положении, образуют грани ромбоэдра.

Для реберных усечений найдено, что у октаэдра и куба таковым является ромбододекаэдр, для тригонтриоктаэдра и тетрагексаэдра — комбинация тетрагонтриоктаэдра и ромбододекаэдра (в классе  $\bar{4}3m$  тетрагонтриоктаэдр замещен комбинацией двух тригонритетраэдров — еще один пример гемиздри). Это подчеркивает родство указанных исходных з. п. ф.

### Заключение

Найдено, что полная совокупность комбинаций простых форм в каждом классе симметрии образует коммутативную полугруппу идемпотентов (с двусторонним сокращением,  $0$  и внешней  $1$ ), изоморфную полугруппе комбинаций  $R_x$ , содержащих простую форму  $X$ , с групповой операцией пересечения. Но известно, что для каждой такой полугруппы есть единственная сопряженная с ней полуструктура. И нужен их более глубокий анализ применительно к объектам минералогической кристаллографии. Выявленная полугруппа реализована в комбинациях простых форм природных кристаллов, что говорит о ее естественном характере.

Всякая фундаментальная задача хороша расширениями и специализациями. Задача Роме-де-Лиля отвечает этому критерию. Ее очевидное расширение — одновременное усечение закрытых простых форм по вершинам и ребрам. Легко видеть, что решение многовариантно, поскольку определяется глубиной усечения тех и других, но тем интереснее с точки зрения поиска природных реализаций. Самая общая формулировка задачи: можно ли гарантировать полное вершинное или / и реберное усечения любого кристаллического полиэдра простыми формами, разрешенными в его классе симметрии. Поскольку перебор вариантов здесь невозможен, следует применить иные рассуждения.

Реберным усечением куба и октаэдра является ромбододекаэдр (табл. 2). Это наблюдение подчеркивает их родство (дуализм) и подсказывает специальную задачу. Из теоремы Эйлера следует, что у геометрически дуальных выпуклых полиэдров числа ребер совпадают. Но всегда ли совпадают их реберные усечения? Ответ не очевиден. Зато очевидно, что теоретический и практический разделы кристалломорфологии вовсе не исчерпали своих ресурсов.

Авторы надеются, что эта статья о задаче Роме-де-Лиля наглядно показала пользу от чтения старых книг, вроде бы имеющих лишь библиографический интерес. Этим качеством обладали наши учителя, выдающиеся ученые и историки науки проф. И. И. Шафрановский и академик Н. П. Юшкин, труды которых [3, 4, 11] не теряют актуальности уже несколько десятилетий.

ЛИТЕРАТУРА

1 *Войтеховский Ю. Л.* 12 этюдов на темы кристалломорфологии, минералогии и петрографии. Апатиты: К & М, 2011. 204 с. 2. *Ляпин Е. С.* Полугруппы. М.: Физматгиз, 1960. С. 83–85. 3 *Шафрановский И. И.* История кристаллографии с древнейших времен до начала XIX столетия. Л.: Наука, 1978. 297 с. 4. *Шафрановский И. И.* Лекции по кристалломорфологии. М.: Высшая школа, 1968. 174 с. 5. *Гольдшмидт В.* О осложнениях и дисплекциях: пер. с нем. Ю. Л. Войтеховского. Апатиты: КНЦ РАН, 1998. 69 с. 6. *Goldschmidt V.* Über Complikation und Displikation. Heidelberg: Carl Winter's Universitätsbuchhandlung, 1921. 70 p. 7. *Богомолов С. А.* Классификация выпуклых многогранников по Фёдорову и Эбергардту // Зап. РМО. 1929. Ч. 58. С. 265–277. 8. *Войтеховский Ю. Л.* Развитие алгоритма Е. С. Фёдорова о комбинаторных типах многогранников и приложение к структурам фуллеренов // Зап. ВМО. 2001. № 4. С. 24–31. 9. *Фёдоров Е. С.* Основания морфологии и систематики многогранников // Зап. Импер. С.-Петербург. минерал. об-ва. 1893. Ч. 30. С. 241–341. 10. *Voytekhovskiy Yu. L.* The Fedorov algorithm revised // Acta Cryst. 2001. A 57. P. 475–477. 11. *Юшкин Н. П.* История минералогии и эволюция фундаментальных минералогических идей: препринт 102. Сыктывкар: Ин-т геологии Коми ФАН СССР, 1984. 52 с.

**Сведения об авторах**

*Войтеховский Юрий Леонидович* — доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор Геологического института КНЦ РАН

E-mail: woyt@geoksc.apatity.ru

*Степенщиков Дмитрий Геннадьевич* — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: stepen@geoksc.apatity.ru

**Author Affiliation**

*Yury L. Voytekhovskiy* — Dr. Sci. (Geology & Mineralogy), Professor; Director of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: woyt@geoksc.apatity.ru

*Dmitry G. Stepenshchikov* — PhD (Geology & Mineralogy); Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: stepen@geoksc.apatity.ru

**Библиографическое описание статьи**

*Войтеховский, Ю. Л.* Специальные комбинации кристаллических простых форм / *Ю. Л. Войтеховский, Д. Г. Степенщиков* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 3 (26). — С. 12–21.

**Reference**

*Voytekhovskiy Yury L., Stepenshchikov Dmitry G.* Special Combinations of Crystalline Simple Forms. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 3 (26), pp. 12–21. (In Russ.).

УДК 551.14:551.71 / 72

## МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ ДОКЕМБРИЯ С УЧЕТОМ ЭВОЛЮЦИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МАНТИИ\*

Е. В. Мартынов<sup>1,2</sup>, Н. Е. Козлов<sup>1,2</sup>, Н. О. Сорохтин<sup>1,2,3</sup>,  
Т. С. Марчук<sup>1</sup>, Е. Н. Фомина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

<sup>2</sup>Апатитский филиал Мурманского государственного технического университета

<sup>3</sup>Институт океанологии РАН

### Аннотация

Представлен метод реконструкции геодинамических обстановок формирования комплексов горных пород в докембрии с учетом эволюции химического состава мантии. Для этого использован эволюционный параметр (относительная масса ядра), введенный В. П. Кеонджаном и А. С. Мониным в целях описания эволюции химического состава мантии Земли. Кроме того, предложен метод линейного упорядочения геологических объектов на основе заданного отношения частичного порядка, что позволило существенно расширить круг решаемых задач.

### Ключевые слова:

*реконструкция, геодинамические обстановки, частичный порядок, линейный порядок, докембрий, мантия.*

## A RECONSTRUCTION METHOD FOR GEODYNAMIC FORMATION CONDITIONS IN PRECAMBRIAN COMPLEXES CONSIDERING EVOLUTION OF THE MANTLE CHEMICAL COMPOSITION

E. V. Martynov<sup>1,2</sup>, N. E. Kozlov<sup>1,2</sup>, N. O. Sorokhtin<sup>1,2,3</sup>,  
T. S. Marchuk<sup>1</sup>, E. N. Fomina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geological Institute of the KSC of the RAS

<sup>2</sup> Apatity Branch of the Murmansk State Technical University

<sup>3</sup> P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the RAS

### Abstract

The paper presents a reconstruction method for geodynamic formation conditions of rock complexes in the Precambrian, which takes into account the evolution of the mantle chemical composition. An important feature of this method is in usage of an evolutionary parameter (the relative nuclear mass), introduced by V. P. Keondzhan and A. S. Monin for the purpose of describing the evolution of the Earth's mantle chemical composition. The method is also provided for linear ordering of geological objects, based on a given partial order relation, which allows to substantially expand the range of solvable problems.

### Keywords:

*reconstruction, geodynamic conditions, partial order, linear order, Precambrian, mantle.*

В данной работе представлен новый подход к реконструкции геодинамических обстановок формирования комплексов докембрия, основанный на геохимических данных и определяющий достаточно высокую надежность результатов этой реконструкции, а именно распознавание геодинамических обстановок с учетом эволюции химического состава мантии. Использование этого метода имеет ограничение: он достаточно надежно работает

---

\*Работа выполнена в ФГБУН Геологическом институте Кольского научного центра РАН по государственному заказу № 0231-2015-0007.

при реконструкции режимов на объектах протерозоя (для объектов архея требуются дополнительные исследования). Метод предполагает использование эволюционного параметра (относительную массу ядра), введенного В. П. Кеонджаном и А. С. Мониным [1] для описания эволюции химического состава мантии Земли, а именно:

$$x = M_c / (C_0 * M),$$

где  $M = 5.977 * 10^{27} \text{ г}$  — масса Земли;  $C_0 = 0.376$  суммарная концентрация «ядерного» вещества в Земле ( $\text{Fe} + \text{FeO} + \text{FeS} + \text{Ni}$ ) и  $M_c$  — масса ядра.

Определить значение эволюционного параметра для фанерозоя и протерозоя можно из уравнения:  $dx / dt = 1 / \mu * (C_0 * (1-x) / (1 - C_0 * x) - C^*) * x$ . Здесь  $C^*$  — значение предельной концентрации насыщения окислами железа (в пересчете на  $\text{Fe}_2\text{O}$ ) твердых силикатных растворов на подошве мантии, а  $\mu = K_c / 4\pi * \gamma$ , где  $K_c$  — коэффициент, характеризующий скорость поступления ядерного вещества из мантии в ядро при бародиффузионном механизме дифференциации земного вещества.

В результате исследований авторов настоящей статьи выяснилось, что решение этого уравнения можно аппроксимировать квадратичной функцией (рис. 1) с индикатором адекватности  $R^2 = 0.9999$ :

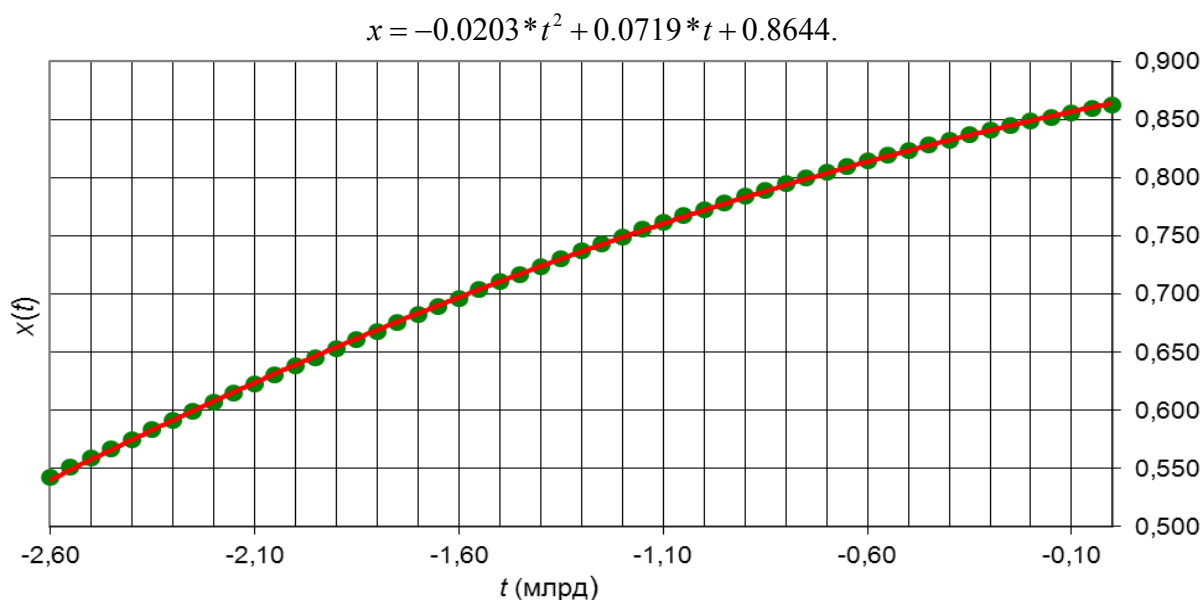


Рис. 1. Результат аппроксимации квадратичной функцией (отсчет времени идет от современности, т. е. от 0)

Коротко метод можно описать следующим образом. Исследуемый объект:  $X^* = \{x_i + \beta * v\}$  ( $i = 1, \dots, n$ ), где  $v$  — вектор «смещения» химического состава мантии во времени;  $\beta$  — некоторый коэффициент, который характеризует отличия по химизму состава мантии от пород основного состава в выбранный момент времени.

Так как  $\beta$  зависит от времени, его значение на данном этапе знаний предлагается выявлять в интерактивном режиме. Принцип определения значения  $\beta$ : постепенное увеличение (уменьшение) его значения, пока не произойдет «скачок» при выборе решения.

В качестве иллюстрации приведем пример результата (табл.) реконструкции геодинамической обстановки формирования протолитов пород Северной Печенги и гранулитовых поясов Евразии. Отчетливо видно, что для породных ассоциаций Северной Печенги он ближе к рифтовому режиму (проторифтогенная природа) и отличается от островодужных обстановок (юные дуги), в то время как для гранулитовых ассоциаций Евразии картина обратная. При этом различие расстояний от Северной Печенги и гранулитов Евразии до юных дуг и рифтов, соответственно, статистически значимо.



Необходимо подчеркнуть, что полученный результат аналогичен выводам об обстановках дометаморфического формирования данных структур, сделанным с использованием независимых геолого-петрогеохимических методов [2, 3].

Таблица

Средние расстояния от метабазальтов Северной Печенги и гранулитовых поясов Евразии до базальтов-эталонов и значения критерия Пури — Сена — Тамуры для различных уровней значимости

Уровни значимости	Структуры (эталоны)	Северная Печенга	Гранулитовые пояса	Значение критерия Пури — Сена — Тамуры
$\alpha = 0.01$	Рифты	2.16		6.88
	Юные дуги		2.71	
$\alpha = 0.05$	Рифты	2.18		6.32
	Юные дуги		2.71	
$\alpha = 0.1$	Рифты	2.21		8.46
	Юные дуги		2.78	

*Примечание.* Средние расстояния указаны только до ближайшего эталона; сравнение средних для соответствующего уровня значимости проводилось с использованием критерия Пури — Сена — Тамуры.

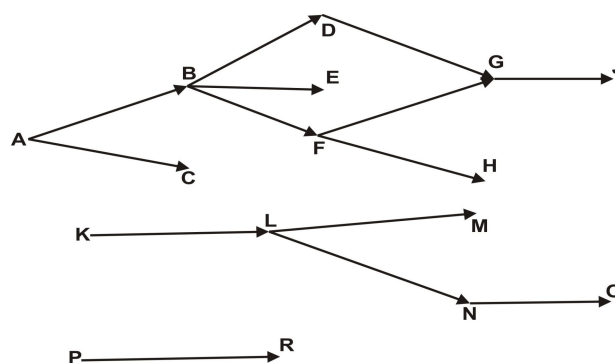


Рис. 2. Пример орграфа, реализующего частичный порядок ( $A \rightarrow B, A \rightarrow C, B \rightarrow E, B \rightarrow D, B \rightarrow F, D \rightarrow G, F \rightarrow H, G \rightarrow J, K \rightarrow L, L \rightarrow M, L \rightarrow N, N \rightarrow O, P \rightarrow R$ ; здесь знак  $\rightarrow$  означает отношение предшествования первой структуры второй)

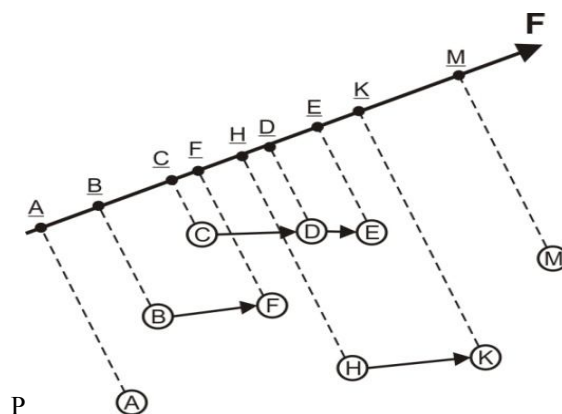


Рис. 3. Поиск линейного тренда на основе заданного частичного порядка для совокупности исследуемых геологических объектов

Другой проблемой, часто стоящей перед исследователями раннедокембрийских комплексов, является поиск линейного упорядочения геологических объектов (например, по времени формирования протолитов слагающих их пород) на основе заданного отношения частичного порядка. Ее решение позволяет существенно расширить круг поставленных задач и облегчается тем, что в ряде случаев есть возможность задать на множестве геологических структур (A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, O, P, R) отношение частичного порядка (рис. 2). При этом каждая структура охарактеризована выборкой химических составов слагающих ее горных пород.

Чтобы перейти от частичного порядка к линейному, был предложен следующий метод: находится линейный тренд F (рис. 3) из условия наилучшего (статистически значимого относительно рангового критерия Пури — Сена — Тамуры) разделения совокупностей проекций химических составов пород изучаемых структур (многомерных величин) на этот тренд.

Указанный метод использован нами ранее при решении конкретной геологической задачи поиска возможного тренда изменения состава архейских пород от более молодых к более древним структурам Кольского п-ова [4]. Для лучшего понимания возможностей предложенной методики вкратце приведем результаты тех исследований. Исходя из геологической ситуации, были приняты следующие граничные условия.

1. Пояс Ура-губа — Колмозеро — Воронья более молодой по отношению к Мурманскому и Кольско-Норвежскому доменам, поскольку его породные ассоциации на дометаморфическом этапе формировались в результате взаимодействия последних на границе между ними [5].

2. Лапландский гранулитовый пояс более молодой по отношению к Лоттинскому домену и Беломорскому подвижному поясу, в результате взаимодействия которых и происходило его заложение как вулканогенно-осадочного комплекса [2].

3. Породы древнейших комплексов Карелии, Канады и Гренландии, исходя из имеющихся датировок, сформированы, в сравнении с архейскими метаморфитами Кольского региона, на более раннем этапе развития Земли.

В результате исследований авторов был найден тренд  $F_1$ , характеризующий изменения состава метабазитов, при котором одновременно выполняются сформулированные выше условия, причем отличия пород для каждой пары расположенных рядом структур должны быть статистически значимыми при 5 %-м уровне значимости (рис. 4).

Следует подчеркнуть, что поиск тренда  $F_1$  базировался на информации о составе лишь тех объектов, относительный возраст которых, исходя из геологических данных, устанавливается достаточно определенно. Взаимное расположение на нем комплексов, перечисленных в различных условиях задачи, а также других структур, не задавалось.

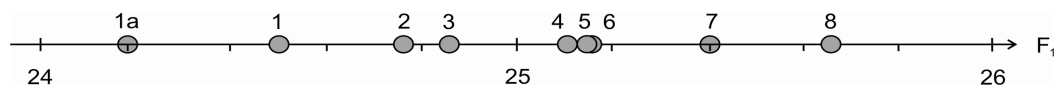


Рис. 4. Положение точек составов архейских метабазитов Кольского региона в сравнении с образованиями Карелии, Канады, Гренландии на временном тренде  $F_1 = 0.34\text{SiO}_2 - 0.46\text{TiO}_2 + 0.25\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.19\text{Fe} + 0.19\text{MnO} - 0.07\text{MgO} + 0.38\text{CaO} - 0.24\text{Na}_2\text{O} - 0.57\text{K}_2\text{O}$ : 1a — древнейшие образования Карелии, Канады, Гренландии; 1–8 — домены Кольского региона: 1 — Кейвский, 2 — Лоттинский (аллареченский и нотозерский комплексы), 3 — Чапомский, Терский и частично Умбинский, 4 — Кольско-Норвежский, 5 — Мурманский, 6 — Беломорский подвижный пояс; 7–8 — архейские пояса Кольского региона: 7 — Лапландско-Колвицкий, 8 — Титовско-Колмозерский

Таким образом, решив данную задачу, имеем возможность в дальнейшем найти на выявленном тренде место для любого объекта, который ранее не использовался в качестве основы для его поиска.

Предложенные методы расширяют возможности использования данных о вещественном составе метаморфитов раннедокембрийских комплексов для познания древнейшей истории Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кеонджян В. П., Монин А. С. Расчет эволюции недр планет // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1976. № 4. С. 3–13.  
2. Козлов Н. Е. Вещественный состав метаморфических комплексов высокобарных гранулитовых поясов и проблема формирования их протолитов (на примере лапландских гранулитов): автореф. дис. ... д. г.-м. н. Спб., 1995. 36 с.  
3. Магматизм, седиментогенез и геодинамика Печенгской палеорифтогенной структуры / В. Ф. Смолькин [и др.]. Апатиты, 1995. 256 с.  
4. Некоторые черты петрогеохимической эволюции архейских метабазитов Кольского региона / Н. Е. Козлов [и др.]. // Материалы междунар. науч.-технич. конф. «Наука и образование-2014» (Мурманск, 24–28 марта 2014 г.). Мурманск: МГТУ, 2014. С. 848–852.  
5. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС: в 2 т. + комплект цветных приложений. М.: ГЕОКАРТ : ГЕОС, 2010. Т. 1. 408 с. + 48 цв. вкл.; Т. 2. 400 с. + 32 цв. вкл. (РОСНЕДРА, РАН, ГЕОКАРТ).

**Сведения об авторах**

*Мартынов Евгений Васильевич* — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН, доцент АФ МГТУ

E-mail: mart@geoksc.apatity.ru

*Козлов Николай Евгеньевич* — доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией геологии и геодинамики Арктики Геологического института КНЦ РАН, директор АФ МГТУ

E-mail: kozlovne@afmgtu.apatity.ru

*Сорокhtин Николай Олегович* — доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института океанологии РАН, ведущий научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: nsorokhtin@mail.ru

*Марчук Татьяна Сергеевна* — инженер 1-й категории Геологического института КНЦ РАН

E-mail: marchuk@geoksc.apatity.ru

*Фомина Екатерина Николаевна* — младший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН, аспирант

E-mail: mart@geoksc.apatity.ru

**Author Affiliation**

*Eugene V. Martynov* — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS, Associate Professor at the Apatity Branch of the Murmansk State Technical University

E-mail: mart@geoksc.apatity.ru

*Nicholas E. Kozlov* — Dr. Sci. (Geology & Mineralogy), Professor, Head of Laboratory at the Geological Institute of the KSC of the RAS, Director of the Apatity Branch of the Murmansk State Technical University

E-mail: kozlovne@afmgtu.apatity.ru

*Nicholas O. Sorokhtin* — Dr. Sci. (Geology & Mineralogy), Chief Researcher of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the RAS, Leading Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: nsorokhtin@mail.ru

*Tatyana S. Marchuk* — Senior Engineer of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: marchuk@geoksc.apatity.ru

*Ekaterina N. Fomina* — Junior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS, Postgraduate

E-mail: mart@geoksc.apatity.ru

**Библиографическое описание статьи**

Метод реконструкции геодинамических обстановок формирования комплексов горных пород докембрия с учетом эволюции химического состава мантии / *Е. В. Мартынов [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 3 (26). — С. 22–26.

**Reference**

*Martynov Eugene V., Kozlov Nicholas E., Sorokhtin Nicholas O., Marchuk Tatyana S., Fomina Ekaterina N.* A Reconstruction Method for Geodynamic Formation Conditions in Precambrian Complexes Considering Evolution of the Mantle Chemical Composition. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 3 (26), pp. 22–26. (In Russ.).

УДК 552.113+552.333+551.734(470.21)

**УЛЬТРАЩЕЛОЧНЫЕ ЭВДИАЛИТОВЫЕ ФОНОЛИТЫ КОНТОЗЕРСКОГО  
КАРБОНАТИТОВОГО ПАЛЕОВУЛКАНА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ):  
ГЕОЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ**

**М. Н. Петровский**

ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

**Аннотация**

Представлены результаты геологических, минералогических и геохимических исследований ультращелочных эвдиалитовых фонолитов Контозерского карбонатитового позднедевонского палеовулкана. Выявлено сходство распределения редкоземельных элементов в фонолитах Контозера и порфиридных лужавритах, являющихся закалочной фазой эвдиалитового комплекса Ловозерского массива. Установлено, что среднее содержание  $ZrO_2$  в фонолитах Контозера равно 1.02 мас. % и является котектическим для расплавов такого состава.

**Ключевые слова:**

*Кольская щелочная провинция, щелочные эффузивы, фонолиты, эвдиалит, верхняя мантия, Контозеро, Ловозеро.*

**ULTRA-ALKALINE EUDIALITE PHONOLITE FROM KONTOZERO CARBONATITE PALEOVOLCANO  
(KOLA PENINSULA): GEOLOGY, MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY**

**Michael N. Petrovsky**

Geological Institute of the KSC of the RAS

**Abstract**

The results of the geological and petrologic study of eudialyte phonolite from the Late Devonian Kontozero carbonatite paleovolcano are discussed in the paper. This eudialyte phonolite corresponds to the primary melt derived from the metasomatized upper mantle source composed of phlogopite-amphibole eclogite. The average  $ZrO_2$  content in the Kontozero phonolite (1.02 wt %) is considered to be cotectic. Similar REE patterns of the Kontozero eudialyte phonolite and porphyritic lujavrite from the chilled contact zone of the Lovozero eudialyte complex and close REE and Zr concentrations in the compared rocks show that this complex could have been formed from a melt similar in composition to the phonolite melt of Kontozero.

**Keywords:**

*Kola alkaline province, alkaline volcanics, phonolite, eudialite, upper mantle, Kontozero, Lovozero.*



**Введение**

Значительная часть потенциальных мировых запасов Zr, Hf, REE, Nb, Ta и Sr связана с эвдиалитовыми рудами, приуроченными к крупнейшим в мире массивам агапитовых нефелиновых сиенитов, таких как Ловозеро (Кольский п-ов, Россия), Илимауссак (Южная Гренландия), Пилансберг (Трансваальская провинция, ЮАР). Проблема формирования эвдиалитовых пород и руд, несмотря на то что ей, как в России, так и за рубежом, посвящено большое количество работ, остается одной из важных проблем петрологии.

Эвдиалит является типоморфным циркониевым минералом практически во всех известных в мире массивах агапитовых нефелиновых сиенитов. Гораздо реже эвдиалит встречается в фонолитах — эффузивных аналогах нефелиновых сиенитов, тем более редко он в них присутствует в качестве породообразующего минерала. Эвдиалитовые фонолиты встречаются крайне редко — это фонолиты: Арис в Намибии, района Атакор в Хогар-Нигерийской провинции,

Джебел-Фезан в Ливии, Поинт-Рокс в Нью-Мексике и Апах в Техасе [1–3]. На территории бывшего СССР эвдиалитовые фонолиты, предположительно слагающие лавовый покров, были известны только на Украинском щите в районе Октябрьского массива [4]. В настоящее время эвдиалитовые фонолиты обнаружены и в пределах Кольской щелочной провинции, их лавовый покров был найден в обнажениях центральной части кальдеры Контозерского палеовулкана [5, 6]. Детальные исследования эвдиалитовых фонолитов Контозерского палеовулкана позволяют нам подойти к конкретному решению проблемы исходных расплавов для рудного эвдиалитового комплекса Ловозерского массива Кольской щелочной провинции.

#### **Аналитические методы исследований**

Основная часть аналитических работ выполнена в лабораториях Геологического института КНЦ РАН. Химический состав пород определялся методом классического количественного анализа (аналитики Г. Г. Гулюта и Л. Г. Балашова). Изучение пород с помощью оптического микроскопа сопровождалось детальными исследованиями минералов с помощью электронного сканирующего микроскопа «Leo 1450» с энергодисперсной приставкой «Roentec» при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда на образце 100–1000 пА. Составы породообразующих минералов определялись с помощью рентгеноспектрального микроанализатора «СатесаMS-46» при ускоряющем напряжении 22 кВ и токе зонда на образце 30 нА (аналитик — Е. Э. Савченко). Малые элементы в породах определялись методом ICP MS в Аналитическом центре ВСЕГЕИ в г. Санкт-Петербурге (аналитики — В. А. Шишлов, В. Л. Кудряшов). Возрастные определения пород производились  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ -методом по биотиту в Аналитическом центре ОИГТМ СО РАН г. Новосибирска (аналитик — А. В. Травин).

#### **Геологическое строение и возраст формирования Контозерского палеовулкана**

Среди проявлений палеозойского щелочного магматизма в Кольской щелочной провинции Контозерский карбонатитовый палеовулкан является уникальным геологическим объектом, единственным для территории бывшего СССР и наиболее древним среди аналогичных образований Земли [5, 7]. В нем, совместно с интрузивными щелочно-ультраосновными и щелочными породами, наиболее полно сохранился вулканогенный разрез, сложенный: карбонатитовыми, щелочно-ультраосновными, щелочными и основными эффузивами и их туфами (рис. 1).

Вулкано-плутоническая ассоциация Контозерского палеовулкана прорывает позднеархейские гранитоиды Центрально-Кольского блока и выполняет кальдерообразную депрессию диаметром 8 км. Ассоциация представлена вулканогенно-осадочными породами ловозерской и контозерской свит, а также интрузивными породами, которые располагаются по периферии кольцевой структуры внутри кальдеры (рис. 1). Согласно результатам гравиразведки и проведенного на ее основе трехмерного плотностного моделирования кальдера имеет асимметричное коническое строение и прослеживается до глубины 5 км [5].

В результате проведенных исследований установлено, что интрузивный комплекс Контозерского палеовулкана (рис. 1) — полифазный. Первые две фазы сложены дифференцированными магматическими сериями (турьяитовая и нефелин-сиенитовая соответственно), а третья фаза не дифференцирована и сложена достаточно однородными высокощелочными нефелиновыми сиенитами.

Породы турьяитовой серии образуют дифференцированный ряд якупирангит — мельтейгит — ийолит — турьяит (рис. 2). Они характеризуются низким коэффициентом агпаитности, равным 0.65–0.98, и, соответственно, отсутствием в минеральном составе агпаитовых темноцветных минералов, клинопироксен в них представлен диопсидом.

Железистость пород меняется от 16 атм. % в якупирангитах до 42 атм. % в турьяитах. Для пород серии характерна высокая недосыщенность кремнеземом (все они в норме содержат мелилит). Как минерал мелилит в значимых количествах присутствует только в ийолитах (5–10 об. %) и турьяитах (до 25 об. %), в мельтейгитах он редок и иногда встречается в виде единичных зерен, а в якупирангитах не обнаружен.

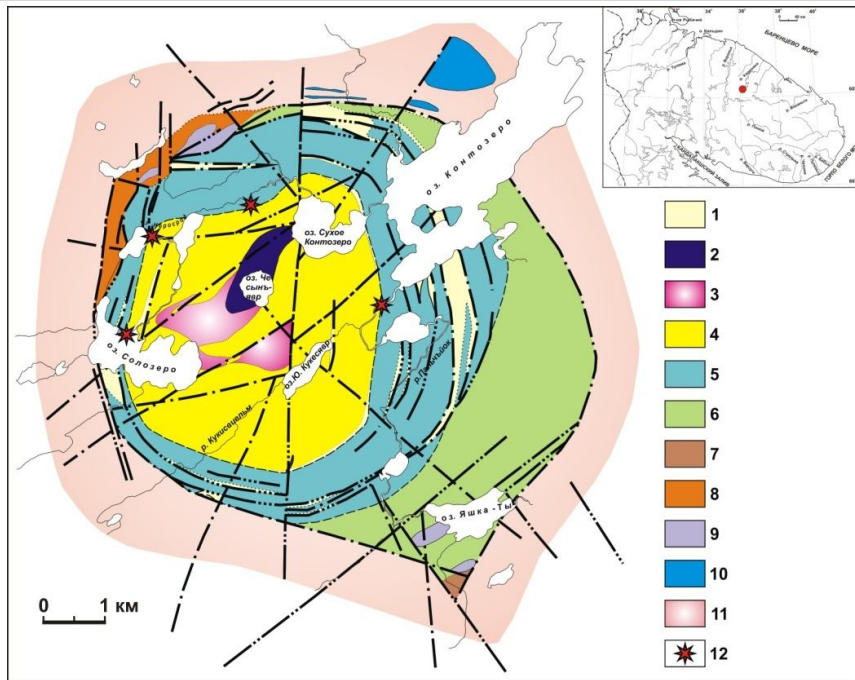


Рис. 1. Схема геологического строения Контозерской палеокальдеры по материалам СЗГТУ с авторскими дополнениями:

1 — цеолит-анкерит-доломитовые метасоматиты, развитые по зонам разломов; 2 — трубки взрыва оливин-флогопитовых пикритов; 3–6 — контозерская свита: 3 — карбонатитовые агломератовые туфы и туфобрекчии жерловой фации; 4 — верхняя карбонатитовая толща; 5 — средняя мелилититовая толща; 6 — нижняя авгититовая толща; 7 — терригенно-вулканогенная толща ловозерской свиты; 8 — нерасчлененные нефелиновые сиениты, пуласкиты и малиньиты; 9 — нерасчлененные якупирангиты, мельтейгиты, ийолиты и турьяиты; 10 — габбро-клинопироксенитовые интрузии низкой щелочности неуставленных возраста и формационной принадлежности; 11 — вмещающие породы (гнейсы и гранито-гнейсы верхнеархейского возраста); 12 — коренные выходы эвдиалитовых фонолитов

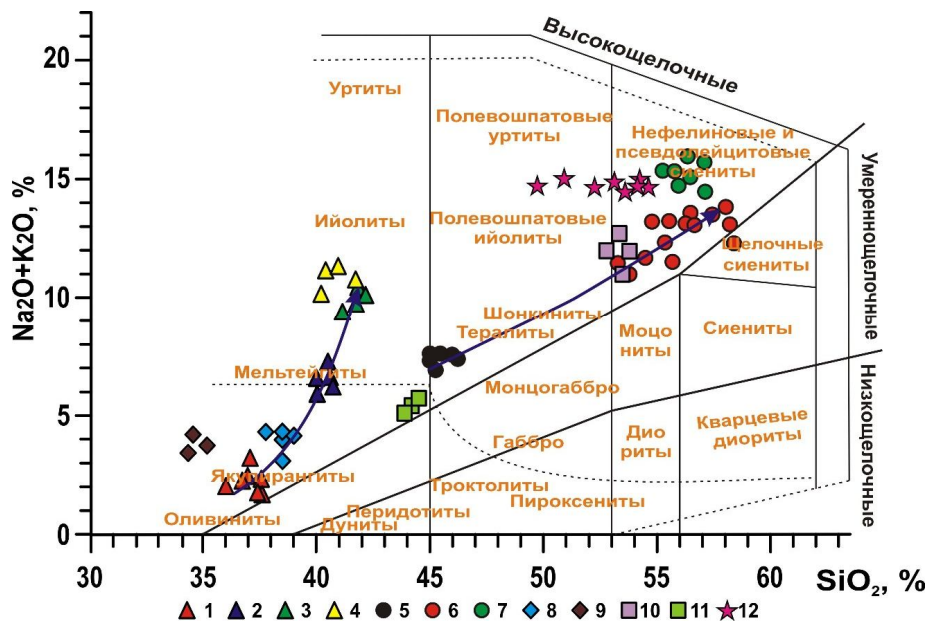


Рис. 2. Диаграмма TAS для пород Контозерской вулcano-плутонической ассоциации:

1–7 — интрузивный комплекс: 1 — якупирангиты, 2 — мельтейгиты, 3 — ийолиты, 4 — турьяиты, 5 — малиньиты, 6 — нефелиновые сиениты и пуласкиты, 7 — высокощелочные нефелиновые сиениты; 8–12 — эффузивный комплекс: 8 — оливиновые меланефелиниты, 9 — мелилитит-фойдные пикриты, 10 — тефритовые фонолиты, 11 — тефриты, 12 — эвдиалитовые фонолиты. Стрелками показаны направления дифференциации магматических серий

Породы нефелин-сиенитовой серии образуют грубо расслоенную толщу трахитоидных малиньитов — нефелиновых сиенитов. На петрохимической TAS-диаграмме точки составов пород серии располагаются в области высокощелочных пород и образуют дифференцированный ряд с разрывом по содержанию  $\text{SiO}_2$  (рис. 2). Все породы этой серии относятся к агпаитовому ряду, коэффициент агпаитности равен 1.02–1.13 и характеризуются значительно меньшей недосыщенностью кремнеземом (нефелин-нормативная группа), чем породы турьяитовой серии. Железистость пород меняется от 54 атм. % в малиньитах до 70 атм. % в нефелиновых сиенитах.

Нефелиновые сиениты третьей фазы залегают вдоль контакта интрузивного и эффузивного комплексов. Они характеризуются ультращелочным и высокожелезистым составом. Коэффициент агпаитности пород равен 1.4–1.8, а железистость пород варьирует в пределах 80–95 атм. %.

Согласно данным картировочного бурения, полученным Л. Г. Сапрыкиной [7], контозерская свита, сложенная вулканогенно-осадочными породами, подразделяется на три толщи (рис. 1). Нижняя авгититовая, мощностью 750 м, сложена авгититами, лимбургитами, их туфами и туффитами с прослоями конгломератов и алевролитов. Средняя мелилититовая, мощностью 900 м, сложена щелочными пикритами, меланефелинитами, нефелинитами, фонолитами и тефритами, их туфами и лавобрекчиями. Верхняя карбонатитовая, мощностью 1000 м, сложена карбонатитовыми лавами, их туфами, туффитами и туфобрекчиями.

При изучении вулканогенно-осадочного разреза Контозерского палеовулкана было установлено, что эффузивы, относимые ранее к щелочным трахитовым порфирирам и щелочным трахитам, являются ультращелочными эвдиалитовыми фонолитами. Они маркируют верхнюю часть разреза мелилититовой толщи (рис. 1) и в различных частях палеокальдеры залегают на лавовых потоках щелочных пикритов (оз. Солозеро и р. Норосродвиельм) либо меланефелинитов (р. Пальчьок) и во всех изученных коренных выходах перекрываются карбонатитовыми лавами и туфами. Мощность покрова фонолитов в среднем около 1.5 м.

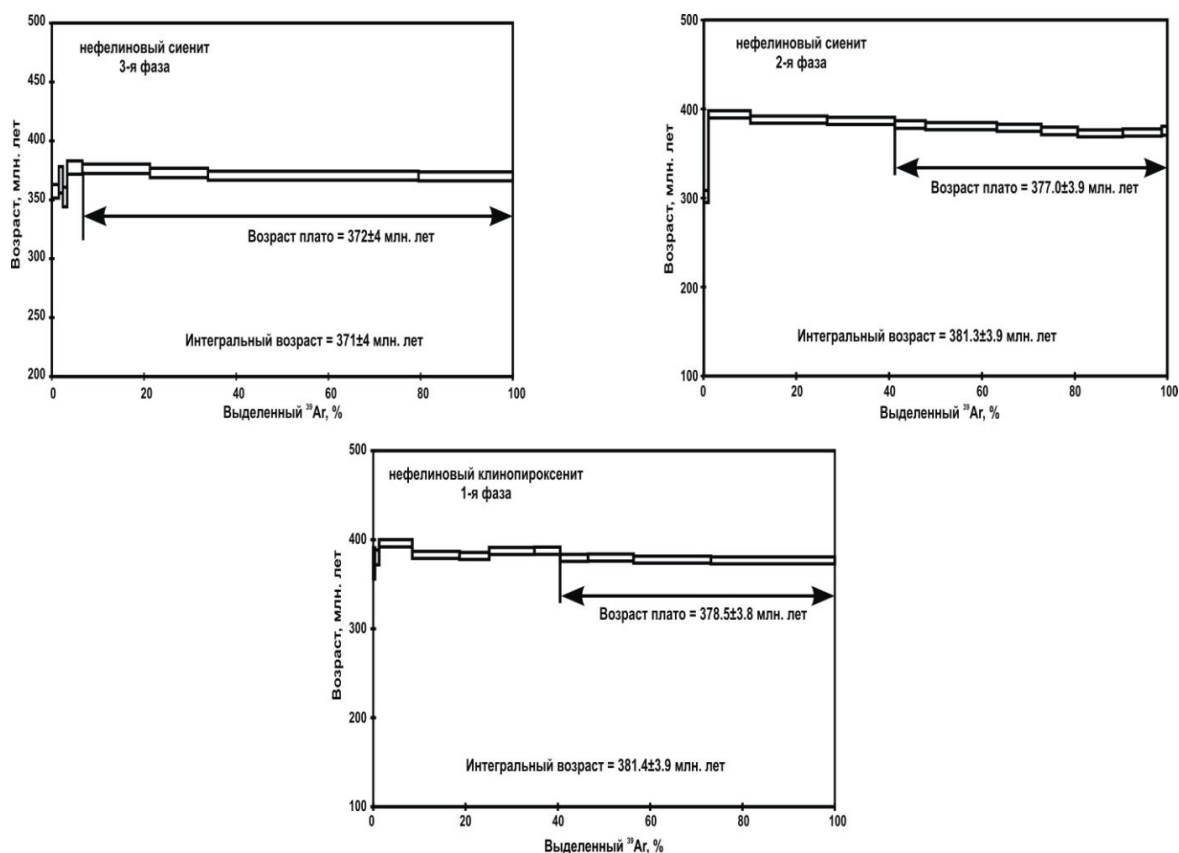


Рис. 3. Результаты  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -исследований методом ступенчатого прогрева монофракций биотита из интрузивных пород Контозерского палеовулкана

Изотопные  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -исследования биотитов из нефелиновых сиенитов и клинопироксенитов Контозерского палеовулкана показали их позднедевонский возраст. Разница во времени между ранней и завершающей интрузивными сериями составляет около 10 млн лет. Возраста, полученные по биотиту  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -методом, равны: для нефелиновых клинопироксенитов 1-й фазы —  $381.4 \pm 3.9$  млн лет; для нефелиновых сиенитов 2-й фазы —  $381.3 \pm 3.9$  млн; для высокощелочных нефелиновых сиенитов 3-й фазы —  $371 \pm 4$  млн лет (рис. 3).

Изохронный возраст эксплозивных карбонатитов, определенный Rb-Sr-методом по породам и минералам, составляет  $380 \pm 8$  млн лет [5]. В центральной части кальдеры, вблизи жерла палеовулкана, породы контозерской свиты, прорваны трубкой взрыва оливин-флогопитовых пикритов, брекчированных жилами фоскоритов и карбонатитов.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст флогопита из фоскоритов составляет  $369 \pm 2$  млн лет [8].

Полученные возрастные датировки интрузивных и эффузивных пород Контозерского палеовулкана согласуются между собой и отвечают возрасту остальных проявлений палеозойского щелочного магматизма в Кольской щелочной провинции.

### **Петрография и минералогия эвдиалитовых фонолитов Контозерского палеовулкана**

Макроскопически фонолиты представляют собой породы порфиривого облика, где на фоне темно-зеленой афанитовой основной массы выделяются фенокристаллы ортоклаза, нефелина, эгирина и эгирин-авгита, а также единичные золотисто-желтые пластинки лампрофилита (рис. 4, в-е).

Микроскопически структура основной массы фонолитов большей частью полнокристаллическая микротрахитовая (рис. 4, б). Она обусловлена обильными выделениями ориентированных лейст ортоклаза, удлинённых либо изометричных кристалликов нефелина, иголок эгирина и округлыми рассеянными мелкими зёрнами эвдиалита.

Наряду с микротрахитовой основной массой наблюдаются участки и с гиалопилитовой структурой, где игольчатые микролиты ортоклаза, нефелина и эгирина находятся в матрице из гидратированного вулканического стекла (рис. 4, а). Минеральный состав фонолитов в объёмных %: ортоклаз — 46–58 %; нефелин — 16–25 %; клинопироксен — 12–20 %; стекло — 0–5 %; амфибол — 0.5 %; анальцит — до 0.5 %; содалит — ед. зёрна; эвдиалит — от ед. зёрн до 4.4 %; лампрофиллит — до 0.3 %; паракелдышит — ед. зёрна; луешит — до 0.3 %; мурманит — ед. зёрна; апатит — ед. зёрна, кальцит и редкоземельные карбонаты — до 1 %.

Отметим особенности состава минералов из фонолитов. Среди темноцветных минералов фонолитов ведущая роль принадлежит клинопироксенам, представленным эгирином, эгирин-авгитом и омфацитом. При описании клинопироксенов использована официальная классификация ММА для пироксенов, кроме того мы приводим минеральный состав пироксенов, который даёт более наглядное представление об изоморфизме в минералах. Химические анализы клинопироксенов приведены в табл. 1, а минеральный состав — в табл. 2. Эгирин — главный среди клинопироксенов, он наблюдается как в основной массе, так и в виде порфириковых вкрапленников (рис. 4, д). Кроме того, он образует внешние каймы по омфациту и катафориту. Эгирин-авгит встречается изредка среди ранних призматических порфириковых вкрапленников, но чаще всего слагает ядерные части крупных фенокристов эгирина либо образует внутренние каймы по реликтовым кристаллам омфацита. Преобладающими в эгирине и эгирин-авгите являются эгириновый и диопсидовый миалы (табл. 2). Омфацит особенно интересен для определения генезиса фонолитов. Он слагает ксеногенные реликтовые зёрна и наблюдается в виде растворённых, оплавленных реликтовых кристаллов размером до 7 мм с нарастающими по краям каймами эгирин-авгита и эгирина (рис. 5, а, б, г, д). Омфацит, как правило, встречается в ассоциации с оплавленными кристаллами катафорита (рис. 5, б, г, д). Для омфацита характерно повышенное содержание  $\text{Sr}_2\text{O}_3$  (табл. 1.) и наличие пойкилитовых включений магнезиального ильменита (рис. 5, д). По минеральному составу омфацит представляет собой клинопироксен диопсид-жадеитового ряда (табл. 2). Содержание жадеитового миала колеблется в пределах 20–25 %. Подобные клинопироксены широко распространены в ксенолитах омфацитового типа, встречающихся в дайковых породах и трубках взрыва Кандалакшского пояса [9].



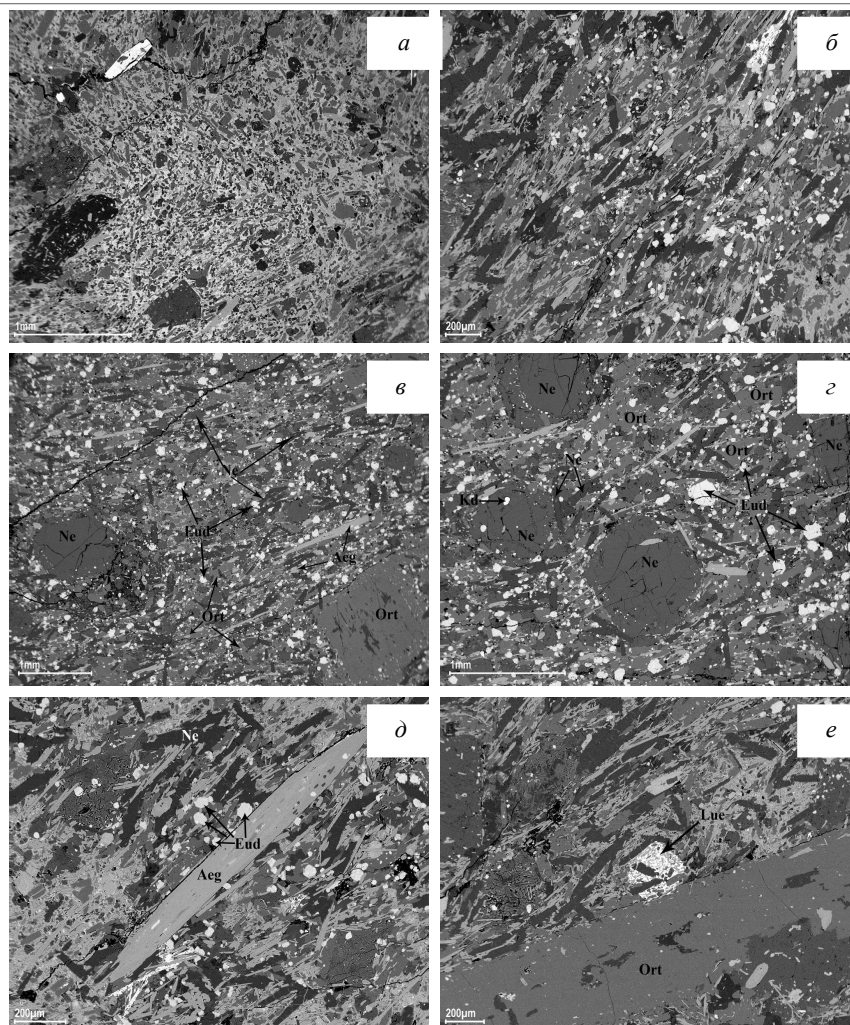


Рис. 4. Характер взаимоотношения минералов в эвдиалитовых фонолитах Контозера. Фото в обратнорассеянных электронах. Пояснения в тексте. Aeg — эгирин; Eud — эвдиалит; Luc — луешит; Ne — нефелин; Ort — ортоклаз

Амфиболы в фонолитах представлены арфведсонитом и катафоритом. Арфведсонит, по-видимому, образуется в результате поздних метасоматических процессов и изредка наблюдается в породе вдоль тонких (2–10 мм) барит-альбит-кальцитовых прожилков, рассекающих фонолиты. Арфведсонит образует крупные сетчатые кристаллы размерами до 16 мм и содержит пойкилитовые включения эгирина, ортоклаза, нефелина. Химический состав арфведсонита приведен в табл. 1. Катафорит слагает округлые, оплавленные ксеногенные реликтовые кристаллы размерами до 3–5 мм (рис. 5, б–д). Он характеризуется повышенным содержанием Cr, Zr и Hf (табл. 1). В катафорите присутствуют включения циркона и Ba-содержащего флогопита (рис. 5, в, з). Химический состав флогопита приведен в табл. 1.

Главным по значению среди породообразующих лейкократовых минералов фонолитов Контозера является щелочной полевой шпат, представленный ортоклазом. Химический состав ортоклаза приведен в табл. 3. Он слагает крупные фенокристаллы и основную массу породы (рис. 4, в, з, е). Размер фенокристаллов изредка достигает 3 см, но, как правило, ограничивается несколькими миллиметрами. Фенокристаллы иногда обнаруживают тонкое зональное строение. Порфиновые вкрапленники ортоклаза обогащены барием и рубидием, а в микролитах эти элементы не были обнаружены (табл. 3). Щелочной полевой шпат, кристаллизовавшийся на ранних этапах и образовавший порфировые вкрапленники, обогащен ортоклазовым миналом, а микролиты и краевые части порфировых вкрапленников обогащены нефелиновым миналом при приблизительно одинаковом содержании альбитового минала.

Таблица 1  
Химический состав клинопироксена, амфибола и флогопита из эвдиалитовых фонолитов Контозера (для оксидов – мас.%, для катионов – ат. ед.)

Компоненты	Эгирин			Эгирин-авгит	Омфацит	Арфведсонит	Кагафорит	Флогопит						
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>											
SiO <sub>2</sub>	51.26	50.93	51.40	51.34	51.75	51.81	50.28	54.03	53.82	51.43	51.55	44.54	44.61	36.36
TiO <sub>2</sub>	2.24	2.16	2.83	2.91	2.29	2.20	0.22	1.18	1.24	1.05	0.87	1.87	1.73	4.38
ZrO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.88	0.75	-
HfO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.14	0.12	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.99	0.94	1.00	1.16	0.85	1.03	2.19	5.45	4.29	0.77	0.53	4.53	4.05	13.71
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	0.57	0.55	-	-	0.51	0.20	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (FeO)	25.87	28.88	24.95	26.96	27.93	28.14	(23.00)	(4.62)	(4.43)	(26.01)	(25.71)	(21.02)	(20.81)	(9.13)
MnO	0.51	0.27	0.58	0.33	0.34	0.26	0.18	0.18	0.15	3.15	3.11	1.11	0.70	0.12
MgO	2.50	1.39	2.83	1.27	1.56	1.48	5.93	11.09	13.21	4.91	4.88	4.68	5.44	22.04
CaO	5.17	1.98	4.84	1.39	1.92	1.77	10.70	17.82	19.06	0.43	0.39	8.43	8.21	-
BaO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.41
Na <sub>2</sub> O	11.18	12.86	10.94	13.92	13.19	12.95	8.34	4.81	3.13	8.46	8.48	6.52	6.40	0.27
K <sub>2</sub> O	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	-	-	-	2.21	2.05	2.88	2.90	9.81
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.06	0.05	0.05	0.07	0.05	-	-	-	0.11	0.14	0.02	0.01	-
Сумма	99.80	99.49	99.45	99.37	99.94	99.72	99.78	99.75	99.88	98.53	97.71	97.13	95.95	96.23
Формульные количества рассчитаны: клинопироксены на 6 (O), амфиболов на 23(O), флогопит на 11(O)														
Si	1.953	1.955	1.957	1.965	1.971	1.974	1.994	1.971	1.960	7.869	7.939	7.046	7.114	2.721
Ti	0.064	0.062	0.081	0.084	0.066	0.063	0.008	0.007	0.034	0.121	0.101	0.222	0.207	0.240
Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.068	0.058	-
Hf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.006	0.005	-
Al	0.045	0.042	0.045	0.052	0.038	0.046	0.099	0.102	0.185	0.139	0.096	0.845	0.761	1.091
Cr	-	-	-	-	-	-	-	0.016	0.016	-	-	0.064	0.025	-
Fe <sup>3+</sup>	0.742	0.834	0.715	0.776	0.800	0.807	-	-	-	0.998	0.955	0.500	0.500	-
Fe <sup>2+</sup>	-	-	-	-	-	-	0.737	0.761	0.135	2.235	2.250	2.225	2.243	0.556
Mn	0.017	0.009	0.019	0.011	0.011	0.008	0.003	0.006	0.005	0.408	0.406	0.149	0.095	0.007
Mg	0.142	0.080	0.161	0.072	0.089	0.084	0.332	0.350	0.717	1.120	1.120	1.103	1.293	2.392
Ca	0.211	0.081	0.198	0.057	0.078	0.072	0.454	0.441	0.744	0.070	0.064	1.429	1.403	-
Ba	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.012
Na	0.826	0.957	0.808	1.033	0.974	0.957	0.640	0.695	0.221	2.510	2.532	2.000	1.979	0.038
K	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	-	-	-	0.431	0.403	0.581	0.594	0.911
V	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	-	-	-	0.011	0.014	0.002	0.001	-

Примечание. В эгирине всё железо в виде Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В эгирин-авгите, омфаците и флогопите всё железо в виде FeO. В амфиболах железо пересчитано на двух- и трёхвалентное по методу [10]. – прочерк обозначает, что компонент не обнаружен.

Минеральный состав клинопироксенов из эвдиалитовых фонолитов Контозера (мол. %)

Миналы		Эгирин						Эгирин-авгит		Омфацит	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\text{NaFe}^{3+}[\text{Si}_2\text{O}_6]$	aeg — эгирин	72	80	70	76	78	80	52	54	5	10
$\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$	di — диопсид	14	8	15	7	9	8	28	28	58	63
$\text{CaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6]$	hd — геденбергит	—	—	—	—	—	—	10	7	8	2
$\text{CaMn}[\text{Si}_2\text{O}_6]$	joh — йолхансенит	2	1	2	1	1	1	—	0.5	0.5	0.5
$\text{NaAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$	jd — жадеит	4	4	5	5	3	5	9	10	24	20
$\text{NaCr}[\text{Si}_2\text{O}_6]$	kos — космохлор	—	—	—	—	—	—	—	—	1.5	1.5
$\text{NaTi}[\text{AlSi}_2\text{O}_6]$	гипотетический Ti-минерал	6	6	7	8	6	5	1	0.5	3	3
$\text{Na}_4[\text{Si}_2\text{O}_6]$	ns — силикат Na	2	1	1	3	2	2	—	—	—	—

Примечание. Номера минералов соответствуют расположению анализов в табл. 1.

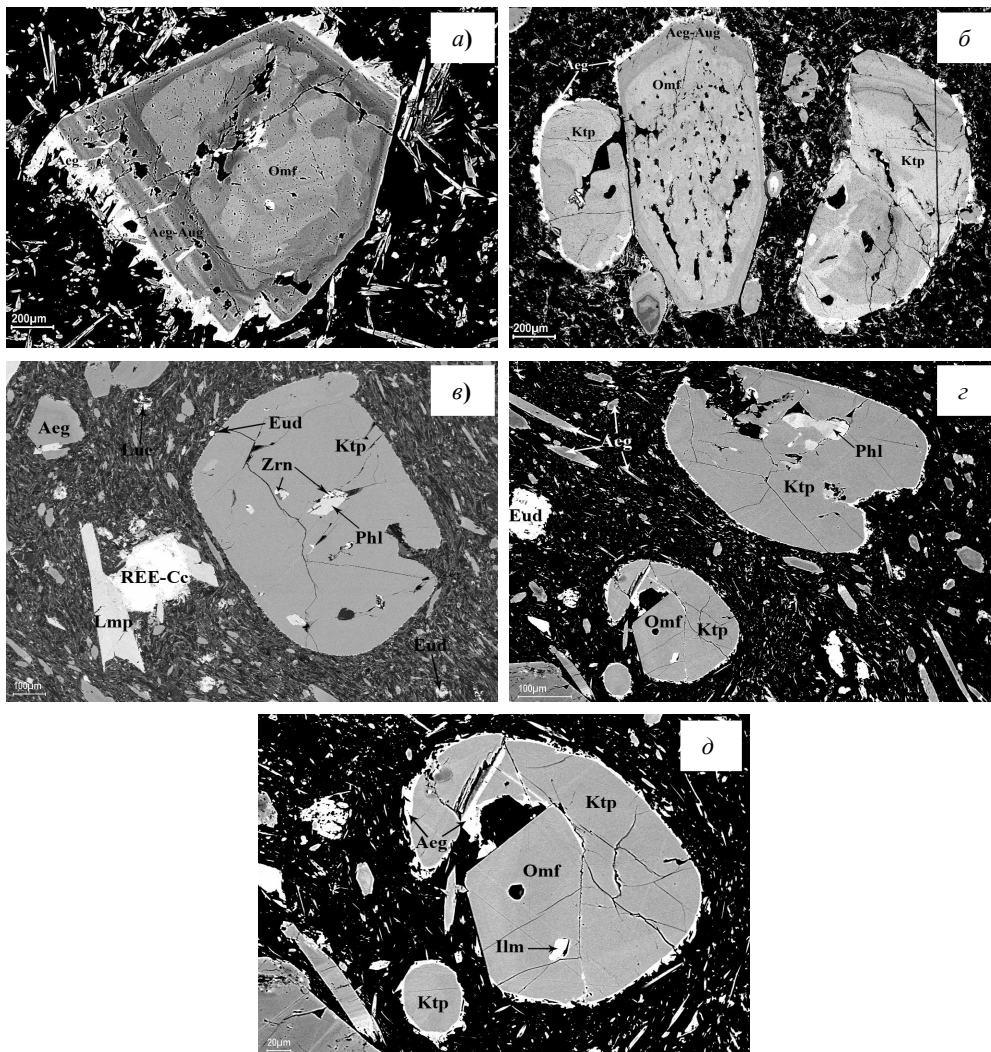


Рис. 5. Ксеногенные минералы в эвдиалитовых фонолитах Контозера. Фото в обратнорассеянных электронах: Aeg-Aug — эгирин-авгит; Ilm — ильменит; Ktp — катафорит; Omf — омфацит; Phl — флогопит; REE-Cc — редкоземельные карбонаты; Zrn — циркон

Второй по значению лейкократовый минерал фонолитов — нефелин, его химический состав приведен в табл. 3. Нефелин, также как и ортоклаз, наблюдается в виде порфинокристаллов и участвует в сложении основной мелкозернистой массы.

Нефелин порфинокристаллов, как правило, имеет характерный гексагональный габитус (рис. 4, в, г). В порфиновых вкрапленниках изредка наблюдается структура снежного кома, отражающая кристаллизацию минерала во время течения расплава. В основной массе нефелин выделяется в форме кристаллов квадратного или изометричного сечения, но чаще, что характерно для микротрахитовой структуры, в виде удлиненных призматических микролитов. Изменение состава нефелина, также как и ортоклаза, в ходе кристаллизации расплава хорошо иллюстрируется положением его фигуративных точек на фазовой диаграмме *qtz-ne-cls* (рис. 6). Точки составов нефелина располагаются в треугольнике *ab-ne-or* вблизи линии *ne-or*. Нефелин порфиновых вкрапленников, также как и ортоклаз, обогащен калием (ортоклазовым миналом), но в ходе кристаллизации происходило его обеднение ортоклазовой компонентой и обогащение нефелиновой составляющей при содержании альбитового компонента приблизительно на одном уровне (рис. 6).

Таблица 3

Химический состав ортоклаза и нефелина из эвдиалитовых фонолитов Контозера  
(для оксидов — мас.%, для катионов — ат. ед.)

Компоненты	Ортоклаз					Нефелин					
	микролиты		вкрапленники			микролиты		вкрапленники			
	центр	центр	центр	край	центр	центр	центр	край	центр	край	
SiO <sub>2</sub>	64.19	63.98	64.21	64.90	65.66	45.48	45.09	47.41	45.42	47.59	45.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.63	21.16	19.47	19.66	19.17	33.56	33.54	31.07	31.92	31.60	32.04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	0.38	0.46	1.32	0.47	0.32	0.18	0.41	0.78	0.14	0.74	0.59
CaO	0.59	0.76	0.30	0.36	0.28	0.12	0.53	0.87	—	0.10	—
BaO	—	—	0.14	0.15	0.14	—	—	—	—	—	—
Na <sub>2</sub> O	6.66	6.14	5.87	5.88	5.00	18.61	17.77	14.67	18.15	17.01	18.06
K <sub>2</sub> O	7.04	7.41	8.54	8.49	9.36	1.99	2.58	4.81	3.54	3.33	3.66
Rb <sub>2</sub> O	—	—	0.12	—	0.15	—	—	—	—	—	—
Сумма	99.49	99.91	99.97	99.91	99.98	99.94	99.92	99.61	99.17	100.37	99.50
Формульные количества рассчитаны: ортоклаз на 8 (O); нефелин на 4 (O)											
Si	2.903	2.885	2.921	2.939	2.970	1.070	1.065	1.123	1.086	1.116	1.078
Al	1.100	1.125	1.044	1.050	1.024	0.931	0.934	0.868	0.900	0.873	0.902
Fe <sup>3+</sup>	0.013	0.016	0.045	0.016	0.011	0.003	0.007	0.014	0.003	0.013	0.011
Ca	0.029	0.037	0.015	0.017	0.014	0.003	0.013	0.022	—	0.003	—
Ba	—	—	0.002	0.003	0.002	—	—	—	—	—	—
Na	0.584	0.537	0.518	0.516	0.439	0.852	0.814	0.674	0.841	0.773	0.836
K	0.406	0.426	0.496	0.491	0.541	0.060	0.078	0.145	0.108	0.100	0.112
Rb	—	—	0.002	—	0.002	—	—	—	—	—	—

Примечание. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* — все железо в виде Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Гидратированное вулканическое стекло представляет собой скрытокристаллическую бурюю изотропную массу, включающую микролиты породообразующих минералов. Химический состав стекла приведен в табл. 4. Вулканическое стекло, по-видимому, является затвердевшим остаточным расплавом, так как на диаграмме *qtz-ne-cls* (рис. 6.) точка его состава занимает промежуточное положение между составами фонолитов и точкой минимума вблизи последней.

Анальцит — типичный вторичный минерал, развивающийся как по нефелину, так и по вулканическому стеклу. Содалит — редкий минерал в фонолитах, встречается совместно с кальцитом и REE-карбонатами (их не удалось четко диагностировать), выполняющими округлые обособления в породах.

Мурманит, также как и арфведсонит, является наложенным вторичным минералом, развивается совместно с ним и содержит пойкилитовые включения практически всех главных и акцессорных минералов фонолитов.

Лампрофиллит является первично магматическим минералом, наблюдающимся как в основной массе в виде микролейст, так и в виде крупных пластинок среди порфировых вкрапленников, причем ориентировка лейст и пластинок лампрофиллита согласна с микротрахитоидностью пород. Составы мурманита и лампрофиллита приведены в табл. 4. Эвдиалит встречается в фонолитах только в виде микрофенокристов совместно с микролитами ортоклаза, нефелина и эгирина (рис. 4, в, з, д). Он имеет правильные кристаллографические очертания, степень идиоморфизма высокая. Всё это указывает на раннюю стадию кристаллизации эвдиалита. В среднем размеры зерен эвдиалита составляют 20-50 мкм и редко достигают 100 мкм. По основному химическому составу (табл. 4) изученный эвдиалит близок эвдиалитам из Хибин и Ловозера, но его состав имеет и свои особенности. Для него характерны повышенные концентрации SrO и BaO (табл. 4), при изучении опубликованной литературы по эвдиалитам нам не удалось найти сведений об этом минерале с такими высокими концентрациями вышеприведенных оксидов. Данная особенность эвдиалита, по-видимому, отражает специфику химического состава исходного расплава — обогащенность его стронцием и барием. На это предположение также указывают повышенные концентрации BaO в полевых шпатах (табл. 3) и присутствие в породах стронциевых минеральных фаз лампрофилита и Sr-апатита (табл. 4).

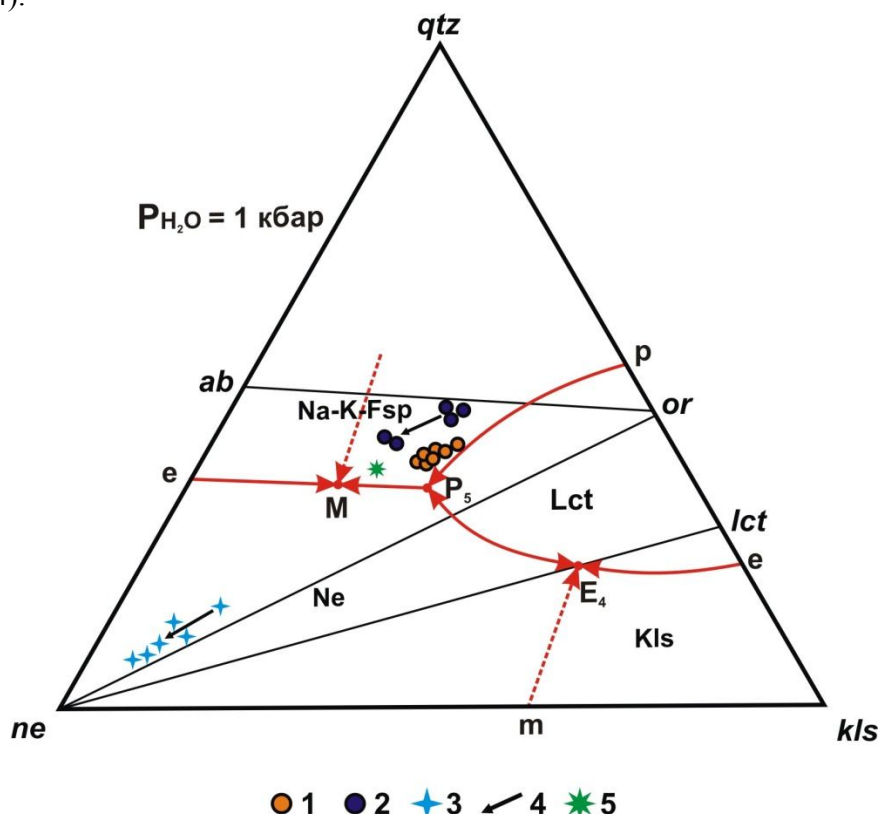


Рис. 6. Положение фигуративных точек составов эвдиалитовых фонолитов Контозера и нефелина, ортоклаза и стекла из них на диаграмме *qtz-ne-cls* при давлении воды, равном 1 кбар [11]:

1 — эвдиалитовые фонолиты; 2 — ортоклазы; 3 — нефелины; 4 — направление изменения составов минералов от ранних фаз к поздним; 5 — стекло

Таблица 4

Химический состав цирконо- и титаносиликатов, ниобатов, фосфатов и стекла (мас. %) из эвдиалитовых фонолитов Контозера

Компо- ненты	Эвдиалит		Пара- кельшиит		Луешит		Мурманит		Лампро- филит		Апатит		Стекло	
	центр	центр	центр	центр	центр	центр	центр	центр	центр	центр	центр	центр	центр	центр
SiO <sub>2</sub>	51.42	53.14	51.02	40.17	0.32	0.10	23.28	24.40	31.79	0.72	1.06	53.12		
TiO <sub>2</sub>	0.52	0.37	0.31	0.20	17.64	15.33	29.67	29.41	28.34	-	-	2.13		
ZrO <sub>2</sub>	11.48	13.54	13.35	39.74	-	-	1.27	1.14	-	-	-	-		
HfO <sub>2</sub>	0.25	0.16	0.48	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-		
ThO <sub>2</sub>	-	-	-	-	0.57	0.71	-	-	-	-	-	-		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.34	0.33	0.29	0.15	0.13	0.05	0.21	0.11	0.10	0.23	0.60	13.52		
FeO	3.31	3.88	3.07	1.09	0.26	0.24	2.52	2.66	2.60	-	0.20	10.09		
MnO	2.34	1.79	2.38	-	-	-	1.11	1.10	2.80	-	0.05	0.44		
MgO	0.07	0.07	-	-	-	0.06	0.88	0.74	0.62	-	0.06	1.46		
CaO	8.04	7.82	8.21	0.86	0.53	0.46	1.76	2.18	0.55	49.64	52.09	4.02		
SrO	3.34	2.24	3.94	-	3.48	3.19	-	-	16.63	3.42	2.33	-		
BaO	0.80	0.72	1.72	-	-	-	-	-	1.18	-	-	-		
ZnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Na <sub>2</sub> O	12.76	12.22	10.61	17.62	14.34	14.31	12.17	12.85	11.53	1.08	0.93	7.13		
K <sub>2</sub> O	0.23	0.21	0.37	-	0.08	0.07	0.74	0.70	0.50	0.08	0.04	4.09		
Rb <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.85	-	0.62	-	47.88	51.51	3.91	4.98	0.52	43.86	41.53	-		
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	0.77	0.89	-	0.88	-	-	-	-		
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.74	0.29	0.42	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.34	0.12	0.25	-	5.49	5.36	-	-	-	-	-	-		
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.65	0.53	0.66	-	6.60	6.07	-	-	-	-	-	-		
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.18	-	-	-	0.39	0.24	-	-	-	-	-	-		
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.31	0.20	0.13	-	1.00	0.58	-	-	-	-	-	-		
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	0.29	-	-	-	-	-	-		
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0.12	-	0.28	0.30	-	-	-	-	-	-		
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15	-	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	0.13	0.15	-	-	-	-	-	-		
Cl	1.84	1.71	1.62	-	-	-	0.09	0.05	-	-	-	-		
Сумма	99.96	99.34	99.71	99.97	99.89	99.91	77.61	81.28	97.16	99.03	98.89	96.00		

Таблица 5

Химический (мас. %) и нормативный (вес. %) составы эффузивных пород Контозера

Компо- ненты	Образцы											
	19-1/06	19-2а/06	19-2б/06	19-2в/06	19-2г/06	19-3/06	22/06	26/06	26-1/06	26-2/06	16/06	16-1/06
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO <sub>2</sub>	20.96	55.84	55.46	55.21	53.52	34.15	52.31	37.70	53.38	42.76	32.64	49.85
TiO <sub>2</sub>	2.86	0.83	1.07	1.31	1.57	1.82	1.07	3.66	1.45	2.02	3.65	0.75
ZrO <sub>2</sub>	0.03	0.84	0.98	1.07	0.95	—	0.22	—	0.13	0.03	—	0.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.56	15.80	15.35	14.97	13.78	6.15	15.66	7.91	15.68	6.87	5.71	16.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.23	3.93	5.13	5.30	6.71	6.50	5.81	3.56	3.03	5.60	6.39	5.98
FeO	7.41	3.39	1.43	1.75	1.58	5.04	1.52	9.13	3.07	9.12	7.56	2.48
MnO	0.37	0.36	0.97	0.93	0.80	0.18	0.92	0.17	0.20	0.17	0.31	0.72
MgO	9.24	0.40	0.79	0.97	1.07	18.64	3.01	14.48	2.90	18.21	7.98	3.15
CaO	22.33	1.52	1.50	1.38	2.07	13.23	3.04	8.58	3.56	10.68	11.83	3.69
Na <sub>2</sub> O	1.44	9.18	8.54	8.25	8.34	2.73	8.13	3.15	7.03	0.75	2.39	7.12
K <sub>2</sub> O	1.34	5.65	6.17	6.38	6.88	1.94	5.49	2.49	5.55	1.23	2.74	6.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.25	0.03	0.11	0.10	0.15	0.29	0.33	0.37	0.15	0.43	0.61	0.22
CO <sub>2</sub>	18.72	0.48	0.51	0.47	0.56	4.38	0.78	5.07	1.58	0.18	15.30	0.95
S	0.56	0.08	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.21	0.09	0.03	0.11	0.18
Cl	—	0.29	0.11	0.11	0.30	—	0.18	—	0.15	—	—	0.14
F	1.65	0.03	0.06	0.10	0.04	0.79	0.17	0.37	0.14	0.19	0.40	0.92
H <sub>2</sub> O-	1.41	0.44	0.78	0.67	0.61	2.30	0.48	1.66	0.61	0.23	0.55	0.43
H <sub>2</sub> O+	1.53	0.86	0.96	0.93	1.00	1.53	0.82	1.48	1.06	1.44	1.81	0.79
Сумма	99.89	99.95	99.93	99.91	99.97	99.68	99.96	99.99	100.06	99.94	99.98	99.88

**Примечание.** Коренной выход на р. Пальчйок: 19-1/06 – мелкообломочный карбонатит-латитовый туф, перекрывающий эвдиалитовые фonoлиты; 19-2а/06 – 19-2г/06 – эвдиалитовые фonoлиты от кровли к подошве лавового потока; 19-3/06 – флогопит-оливиновые меланефеллиты подстилающие эвдиалитовые фonoлиты. Коренной выход в русле р. Норосродвельм: 22/06 – эвдиалитовый фonoлит. Коренной выход в русле протоки между озерами Норосрод: 26/06 – карбонатные нефелиновые трахибазаниты перекрывающие эвдиалитовые фonoлиты; 26-1/06 – эвдиалитовый фonoлит; 26-2/06 – подстилающие плагиоклаз-флогопит-диопсидовые пикриты. Коренной выход на берегу оз. Солозеро: 16/06 – карбонатит-латит перекрывающий эвдиалитовые фonoлиты; 16-01/06 – эвдиалитовый фonoлит.

В отличие от нефелиновых сиенитов Ловозера и Хибин, в фонолитах Контозера присутствует луешит, а не лопарит. Луешит рассеянно встречается в породах в виде изометричных мелких зерен и часто содержит микроигльчатые включения эгирина. Химический состав луешита приведен в табл. 4. Лопарит в фонолитах обнаружить не удалось. P-t-параметры кристаллизации фонолитов оценены с помощью полевошпатового геотермобарометра [11], позволяющего определить их при отсутствии плагиоклаза по составу K-Na-Fsp, и равны —  $P(\text{H}_2\text{O})$  около 0.5–1.0 кбар, а  $t_{\text{кр}}$  около 950–980 °С. Полученные термодинамические условия хорошо согласуются с экспериментальными данными по плавлению эвдиалитсодержащих пород [12].

### Петрогеохимические особенности эвдиалитовых фонолитов Контозерского палеовулкана

Химический состав фонолитов Контозера, а также подстилающих и перекрывающих их эффузивов приведены в табл. 5. По содержанию  $\text{SiO}_2$  эвдиалитовые фонолиты относятся к породам средней группы и характеризуются ультращелочным (ультраагпаитовым) составом,  $K_{\text{агп}} = 1.17\text{--}1.54$ , калиево-натриевого типа щелочности —  $n$  ( $n = 100 \cdot \text{Na}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ ) равно 64.8–71.2 мол. %. По насыщенности кремнеземом изученные фонолиты относятся к нефелин-нормативной группе. Для фонолитов характерно высокое обогащение цирконием, содержание  $\text{ZrO}_2$  в среднем около 1.02 мас. % (табл. 5). Железистость фонолитов варьирует в пределах от 52.6 до 90.7 атм. %. В целом химический состав эвдиалитовых фонолитов близок среднему составу эвдиалитового комплекса Ловозера.

Таблица 6

Редкоэлементный состав (г/т) эвдиалитовых фонолитов Контозера

Компоненты	Образцы				
	19-2а/06	19-2б/06	19-2в/06	19-2г/06	22/06
Rb	267	317	329	245	185
Sr	1520	2530	2770	2000	2880
Y	336	359	343	460	549
Nb	457	1510	1610	488	1030
Ba	471	896	1990	432	601
La	180	445	425	296	399
Ce	383	861	800	627	786
Pr	50.4	99.5	89.9	78.7	97.2
Nd	221	380	362	331	394
Sm	61.9	86.0	82.2	86.6	97.7
Eu	17.9	22.9	22.9	25.7	30.4
Gd	54.5	70.8	67.1	74.6	91.0
Tb	11.0	13.0	12.4	15.9	17.8
Dy	64.0	70.9	67.2	88.8	105.0
Ho	12.2	12.8	12.2	16.6	20.4
Er	39.7	36.7	35.9	53.3	60.7
Tm	4.78	4.72	4.76	6.70	7.64
Yb	33.7	31.5	32.6	46.3	51.8
Lu	4.07	3.81	3.67	5.24	5.92
Hf	198	194	205	216	279
Ta	37.1	67.5	72.8	38.9	62.6
Th	21.8	146.0	141.0	29.7	59.4
U	11.1	55.6	55.3	16.6	36.4



Для эвдиалитовых фонолитов Контозера характерны высокие содержания литофильных редких и редкоземельных элементов (табл. 6). Концентрация редкоземельных элементов в фонолитах на 2–3 порядка выше, чем в "хондритовой" мантии. Распределение REE в фонолитах характеризуется "пологими" спектрами (рис. 7) с очень небольшими углами наклона  $(\text{REE}_{\text{Ce}}/\text{REE}_{\text{Y}})_{\text{N}} = 0.9\text{--}1.4$ , что говорит о слабо фракционированном распределении редкоземельных элементов. О слабой дифференцированности фонолитов говорят отношения  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 3.6\text{--}9.5$  и  $(\text{Nd}/\text{Sm})_{\text{N}} = 1.2\text{--}1.4$ . Составы REE в фонолитах характеризуются отсутствием выраженной европиевой аномалии, отношение  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  равно 0.93–0.97. На рис. 7 для сопоставления нанесены поля распределения REE в эвдиалитовых и лопаритовых луявритах Ловозерского массива, в палеозойских фонолитовых дайках Кольской щелочной провинции и графики распределения REE в порфиридных эвдиалитовых луявритах Ловозерского массива.

Как было показано при характеристике минералов эвдиалитовых фонолитов Контозера, в них присутствуют оплавленные и частично резорбированные кристаллы Sr-содержащего омфациита и Zr- и Hf-содержащего катафорита с включениями в них Mg-содержащего ильменита, циркона и Ba-содержащего флогопита. Все эти минеральные фазы являются чуждыми для химического состава фонолитов Контозера. Морфология нахождения этих минералов в породах и их состав позволяют рассматривать их как реликтовые минеральные фазы дезинтегрированных глубинных ксенолитов из зоны генерации расплава эвдиалитовых фонолитов Контозера, а специфика их химического состава отражает привнос в источник материнской магмы щелочей и редких элементов. Исходя из того, что в ассоциации реликтовых минералов присутствует и играет ведущую роль Sr-содержащий омфациит, можно предположить, что источником фонолитового расплава являлся верхнемантийный эклогит, испытавший значительный редкоэлементно-щелочной метасоматоз. Индикаторными реликтовыми минералами этого метасоматоза являются катафорит с примесью Zr и Hf и с включениями в нем циркона и флогопита с изоморфной примесью Ba. На "недифференцированное" происхождение фонолитов указывает и нефракционированное распределение REE (рис. 7).

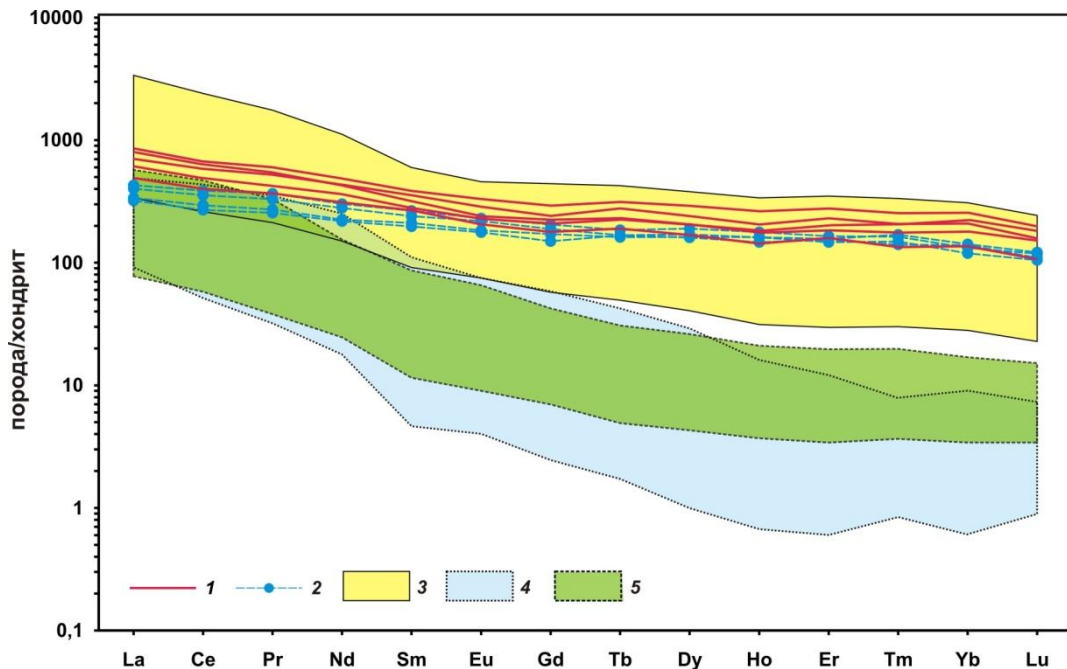


Рис. 7. Нормализованное к хондриту распределение РЗЭ в эвдиалитовых фонолитах в сравнении с распределением в породах Ловозерского массива и в палеозойских фонолитовых дайках Кольской щелочной провинции: 1 — эвдиалитовые фонолиты; 2 — порфиридные луявриты Ловозера; 3 — поле эвдиалитовых луявритов Ловозерского массива; 4 — поле лопаритовых луявритов Ловозерского массива; 5 — поле палеозойских фонолитовых даек Кольской щелочной провинции

Распределение REE в фонолитах Контозера значительно отличается как от распределения редкоземельных элементов в эвдиалитовых и лопаритовых луявритах Ловозера, так и от распределения в фонолитовых дайках, характеризующихся резко дифференцированным распределением REE (рис. 7). Следует отметить, что концентрации REE в изученных фонолитах близки концентрациям редких земель в эвдиалитовом комплексе Ловозерского массива.

Порфиroidные эвдиалитовые луявриты, рассматривающиеся как эндоконтактная закалочная фация эвдиалитового комплекса Ловозерского массива и отвечающие, вероятно, исходному расплаву для этого комплекса [12, 13], обнаруживают признаки геохимического сходства с эвдиалитовыми фонолитами Контозера. Графики распределением REE в порфиroidных эвдиалитовых луявритах в большой степени сходны с графиками распределения REE фонолитов Контозера (рис. 7), при этом графики распределения REE как порфиroidных луявритов, так и фонолитов Контозера не выходят за границы поля распределения REE эвдиалитового комплекса Ловозера.

### Обсуждение результатов исследований

Проблема происхождения агпайтовых расплавов нефелиновых сиенитов и их эффузивных аналогов — агпайтовых фонолитов — дискуссионна. Наиболее распространены две точки зрения на генезис этих расплавов.

1. Магмы, отвечающие по составу агпайтовым нефелиновым сиенитам и фонолитам, могут быть конечными продуктами длительной дифференциации сильно недосыщенных кремнеземом "первичных" магм мантийного происхождения, таких как меланефелинитовые либо щелочно-базальтовые. Появление в конечных продуктах дифференциации агпайтовых минералов связывается с проявлением плагиоклазового и пироксенового эффектов [12, 14–16].

2. Магмы, отвечающие по составу агпайтовым нефелиновым сиенитам и фонолитам, могут быть непосредственно выплавлены из метасоматически измененного под воздействием K-Na-Ca карбонатных растворов-расплавов мантийного субстрата [17–21].

На то, что фонолиты должны являться первичными мантийными расплавами, а не дифференциатами каких-то других расплавов, указывает почти постоянное присутствие в них верхнемантийных ксенолитов, представленных метасоматизированными эклогитами и шпинелевыми лерцолитами. Кроме того, в этих ксенолитах часто отмечается присутствие стекол фонолитового состава [1–5, 19–24]. Если бы фонолиты являлись остаточными расплавами, то наличие в них этих ксенолитов объяснить было бы невозможно.

Как было показано выше, эвдиалит в фонолитах Контозера кристаллизовался на ранней стадии, а это указывает на котектическую насыщенность расплава цирконием. Соответственно, и среднее содержание  $ZrO_2$  в фонолитах Контозера, равное 1.02 мас. %, можно рассматривать как котектическое. Этот вывод хорошо коррелирует с результатами, полученными Л. Н. Когарко с соавторами [12]. Они на примере эвдиалитовых комплексов Ловозера и Илимауссака и на основании экспериментальных данных определили, что концентрация  $ZrO_2$  около 1 мас. % является котектической, и при таком содержании  $ZrO_2$  в ультраагпайтовом расплаве из него уже на ранних стадиях начинает кристаллизоваться эвдиалит. Данные предположения подкрепляются характером распределения редкоземельных элементов в изученных фонолитах Контозера, порфиroidных луявритах и эвдиалитовом комплексе Ловозерского массива. Анализ спектров распределения РЗЭ в фонолитах и порфиroidных луявритах показывает, что при кристаллизационной дифференциации их составов образуется дифференцированный комплекс пород, сходный по распределению РЗЭ с эвдиалитовым комплексом Ловозерского массива.

### Заключение

Приведенные в статье данные позволяют сделать следующие выводы.

1. Эвдиалитовые фонолиты Контозерского палеовулкана представляют собой первичный расплав, образовавшийся не в ходе кристаллизационной дифференциации какого-то более

ультраосновного расплава, а выплавившийся непосредственно из метасоматизированного верхнемантийного субстрата, представлявшего собой флогопит-амфиболовый эклогит.

2. Расплав эвдиалитовых фонолитов Контозерского палеовулкана на раннем этапе кристаллизации имел котектическую насыщенность цирконием и при кристаллизационной дифференциации мог бы образовать эвдиалитовые магматические месторождения куммулятивного типа.

3. Сходство распределения редкоземельных элементов в эвдиалитовых фонолитах и порфиридных луавритах, являющихся закалочной фазой эвдиалитового комплекса Ловозерского массива, близость концентраций редкоземельных элементов и циркония в перечисленных породах указывают на то, что эвдиалитовый комплекс Ловозерского массива мог образоваться из расплавов, сходных по составу с фонолитовым расплавом Контозера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Sazhinite-(La),  $\text{Na}_3\text{LaSi}_6\text{O}_{15}(\text{H}_2\text{O})_2$ , a new mineral from the Aris phonolite, Namibia / **F. Cámara [et al.]** // *Mineral. Mag.* 2006. Vol. 70, N 4. P. 405–418.
2. Von Knorring O., Franke W. A preliminary note on the mineralogy and geochemistry of the Aris phonolite, SWA // *Communications of the Geological Survey of S. W. Africa / Namibia*. 1987. N 3. 61 p.
3. Smith A. E. Texas mineral locality index // *Rocks and Minerals*. 1991. Vol. 66, N 3. P. 196–224.
4. Кривдик С. Г., Ткачук В. И. Эвдиалитсодержащие агапитовые фонолиты и дайковые нефелиновые сиениты Октябрьского массива (Украинский щит) // *Геохимия*. 1988. № 8. С. 1133–1139.
5. Arzamastsev A. A., Petrovsky M. N. Paleozoic alkaline volcanism of the Northeastern Fennoscandia: Geochemical features and petrologic consequences // *Deep-seated magmatism, its sources and plumes: Proceedings of the XI International Conference*. Irkutsk: Publishing House of the Institute of Geography of the SB of the RAS, 2011. P. 96–125.
6. Петровский М. Н., Савченко Е. Э. Эвдиалитовые фонолиты Контозерского карбонатитового палеовулкана — возможный исходный расплав для эвдиалитового комплекса Ловозерского массива // *Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений: материалы всерос. науч. конф. (с международным участием), посвящен. 100-летию со дня рождения академика Николая Алексеевича Шило (1913–2008) (Москва, ИГЕМ РАН, 29 октября — 1 ноября 2013 г.)*. М.: ИГЕМ РАН, 2013. С. 155.
7. Пятенко И. К., Осокин Е. Д. Геохимические особенности Контозерского карбонатитового палеовулкана на Кольском полуострове // *Геохимия*. 1988. № 5. С. 723–737.
8.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирование флогопита из фоскорита Контозерского комплекса, Кольская щелочная карбонатитовая провинция, Балтийский щит / *Е. Г. Балаганская [и др.]* // *Геохимия магматических пород. Школа "Щелочной магматизм Земли"*. М.: ГЕОХИ РАН, 2002. С. 16–17.
9. Ветрин В. Р., Калинин М. М. Реконструкция процессов внутрикорового и корово-мантийного магматизма и метасоматоза (по результатам изучения глубинных включений). Апатиты: КНЦ РАН, 1992. 106 с.
10. Дубровский М. И. Рациональная классификация амфиболов и метод расчета их кристаллохимических формул на минеральные Апатиты: КФАН СССР, 1981. 64 с.
11. Phase equilibrium in the undersaturated part of Petrogeny's residua system: a preliminary graphical analysis of its potassic field with potential implications for the origin of pseudoleucite / *A. Korobeinikov [et al.]* // *N. Jb. Miner. Mh.* 1998. N 6. P. 241–252.
12. Когарко Л. Н., Лазуткина Л. Н., Кригман Л. Д. Условия концентрации циркония в магматических процессах. М.: Наука, 1988. 120 с.
13. Буссен И. В., Сахаров А. С. Петрология Ловозерского щелочного массива. Л.: Наука, 1972. 296 с.
14. Yoder H. S., Kushiro I. Composition of residual liquids in nepheline — diopside system // *Yb. Carnegie Inst. Wash.* 1972. Vol. 71. P. 413–416.
15. Когарко Л. Н. Проблема генезиса агапитовых магм. М.: Наука, 1977. 293 с.
16. Йодер Х. С. Мелилитсодержащие породы и родственные им лампрофиры // *Эволюция изверженных пород*. М.: Мир, 1983. С. 381–399.
17. Baily D. K. Mantle metasomatism — perspective and prospect // *Alkaline Igneous Rocks. Geol. Soc. London Spec. Publ.* 1987. N 30. P. 1–13.
18. Lee W.-J., Wyllie P. J. Petrogenesis of carbonate magmas from mantle to crust constrained by the system  $\text{CaO}-(\text{MgO}+\text{FeO}^*)-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2)-\text{CO}_2$  // *J. Petrol.* 1998. Vol. 39, N 3. P. 495–517.
19. Dalton J. A., Presnell D. C. Carbonatitic melts along the solidus model lherzolite in the system  $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{CO}_2$  from 3 to 7 Gpa // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1998. Vol. 131. P. 123–135.
20. Kogarko L. N., Kurat G., Ntaflou T. Carbonate metasomatism of the oceanic mantle beneath Fernando de Noronha Island, Brazil // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2001. Vol. 140. P. 577–587.
21. Когарко Л. Н. Глобальный мантийный метасоматоз и проблемы генезиса щелочного магматизма и связанного редкометалльного оруденения // *Эволюция петрогенеза и дифференциация вещества Земли: материалы 10-го петрографического совещания*. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. С. 99–100.
22. Wilson M., Downes H. Tertiary-Quaternary extension-related alkaline magmatism in Eastern and Central Europe // *J. Petrol.* 1991. Vol. 32. P. 811–849.
23. Witt-Eickchen G., Kramm U. Mantle upwelling and metasomatism beneath Central Europe: geochemical and isotopic constraints from mantle xenoliths from the Rhön (Germany) // *J. Petrol.* 1997. Vol. 38. P. 479–493.
24. Phonolitic diatremes within the Dunedin Volcano, South Island, New Zealand / *R. C. Price [et al.]* // *J. Petrol.* 2003. Vol. 44, N 11. P. 2053–2080.

**Сведения об авторе**

*Петровский Михаил Николаевич* — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН  
E-mail: petrovskiy@geoksc.apatity.ru

**Author Affiliation**

*Michael N. Petrovsky* — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS  
E-mail: petrovskiy@geoksc.apatity.ru

**Библиографическое описание статьи**

*Петровский, М. Н.* Ультращелочные эвдиалитовые фонолиты контозерского карбонатитового палеовулкана (Кольский полуостров): геология, минералогия и геохимия / *М. Н. Петровский* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 3 (26). — С. 27–43.

**Reference**

*Petrovsky Michael N.* Ultra-Alkaline Eudialite Phonolite from Kontozero Carbonatite Paleovolcano (Kola Peninsula): Geology, Mineralogy and Geochemistry. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 3 (26), pp. 27–43. (In Russ.).

УДК 552.321.5+553.491(470.21)

**НОВЫЕ ДАННЫЕ О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ  
И БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ЮЖНОСОПЧИНСКОГО  
МАССИВА (РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИЙ МОНЧЕГОРСКИЙ КОМПЛЕКС,  
КОЛЬСКИЙ РЕГИОН)**

**Т. В. Рундквист, П. В. Припачкин, Я. А. Мирошникова, А. В. Базай**  
ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

**Аннотация**

Приведены новые факты, дополняющие данные по геологическому строению и благороднометалльной минерализации массива Южносопчинский в Мончегорском районе. В одном из коренных обнажений задокументирован участок магматической брекчии, где обломки представлены метапироксенитами и дайкой метагаббродолеритов, а цемент — крупнозернистыми и пегматоидными метагабброноритами. Анализ разреза скважины в зоне контакта двух магматических фаз показал присутствие стометровой контактовой зоны, где развиты брекчия и жильные тела. Также приведены новые аналитические данные о составе благороднометалльной минерализации Южносопчинского массива.

**Ключевые слова:**

*габбронориты, пироксениты, магматическая брекчия, сульфидная и благороднометалльная минерализация, минералы платиновых металлов.*

**NEW DATA ON GEOLOGICAL STRUCTURE AND NOBLE METALS MINERALIZATION  
IN YUZHNSOPCHINSKY MASSIF (EARLY PROTEROZOIC COMPLEX IN MONCHEGORSK AREA, KOLA  
REGION)**

**Tatyana V. Rundkvist, Paul V. Pripachkin, Yana A. Miroshnikova, Aya V. Bazay**  
Geological Institute of the KSC of the RAS

**Abstract**

The article presents new facts supplementing the data on geological structure and noble metal mineralization in Yuzhnosopchinsky massif of Monchegorsk area. In the outcrop, a site of the magmatic breccia has been mapped. In this breccia, the fragments are represented by metamorphed pyroxenites and gabbro-dolerites, whereas the cement is formed by coarse-grained and pegmatitic metagabbronorites. The interval between the injections of these two phases is likely to be significant, because gabbronorite phase was injected even after the formation of gabbro-dolerite dikes. Analysis of the stratigraphic column of the drill hole in the contact zone of these two magmatic phases has showed a hundred-meter zone, where the magmatic breccia and veins are present. The new analytical data on the composition of noble metal mineralization in the Yuzhnosopchinsky massif are also given.

**Keywords:**

*gabbro, pyroxenite, magmatic breccia, sulphide and noble metal mineralization, minerals of platinum metals.*

**Введение**

Южносопчинский массив (ЮСМ) находится в юго-восточной части Мончегорского комплекса ультраосновных и основных пород раннепротерозойского возраста. В плане ЮСМ представляет собой крупное магматическое тело длиной около шести километров и шириной около двух километров, протягивающееся с северо-запада на юго-восток (рис. 1, врезка). С запада ЮСМ примыкает к Мончетундровскому массиву комплекса Главного хребта. По данным ряда авторов [1, 2], ЮСМ — часть Мончетундровского массива. С севера ЮСМ ограничен тектонической зоной и контактирует с архейскими диорито-гнейсами и с преимущественно ортопироксенитовым массивом Сопча (Мончегорский комплекс). С юга

ЮСМ граничит с раннепротерозойскими кислыми метавулканитами свиты Арваренч зоны Имандра-Варзуга. По данным бурения ЮСМ имеет в целом моноклинальное залегание с падением на юго-запад под углами от 5–20 до 45° [2].

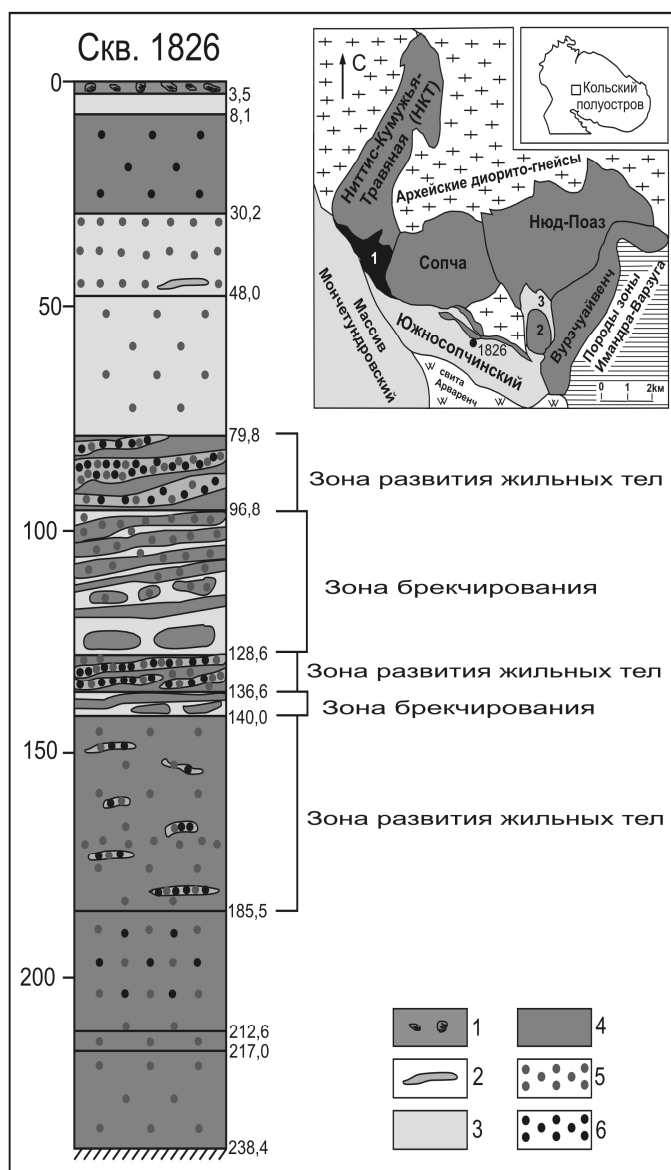


Рис. 1. Геологическая колонка скважины 1826. По данным ОАО ЦКЭ, с изменениями:

1 — валунная морена; 2 — жильные тела; 3 — габбронориты; 4 — нориты, оливиновые нориты, ортопироксениты, дуниты, гарцбургиты; 5 — сульфидная вкрапленность; 6 — магнетитовая вкрапленность. На врезке — положение скважины 1826 в пределах массива ЮС. Цифрами на врезке обозначены:

1 — дунитовый блок; 2 — блок Верхний Нюд; 3 — массив Габбро-10

По геологическому строению ЮСМ разделяется на две зоны. Нижняя зона имеет мощность 250–300 м и сложена переслаивающимися метаноритами, метапироксенитами и метаперидотитами [2]. Верхняя зона ЮСМ представлена лейко-мезократовыми метагабброноритами и метагаббро. Породы вблизи от контакта между верхней и нижней зонами массива интенсивно рассланцованы. Кроме того, в зоне контакта проявлены магматические брекчии, пегматоидные и жильные тела [1, 3]. В работе В. В. Чащина и соавторов [2] приводятся возрастные данные для нижней и верхней зон, полученные U-

Pb-методом по циркону: возраст оруденелых метаноритов нижней краевой зоны ЮСМ равен  $2504 \pm 1$  млн лет, а возраст метагаббро верхней зоны —  $2478 \pm 20$  млн лет. Изотопно-геохронологические данные подтверждают геологические наблюдения, свидетельствующие о полихронности формирования ЮСМ.

Авторами настоящей статьи в результате детального картирования восточной части ЮСМ, исследования его разреза в керне скважины 1826 и изучения благороднометалльной минерализации получены данные, позволяющие дополнить представление о генезисе массива, чему и посвящена настоящая заметка.

### Структурные взаимоотношения пород в коренном обнажении на восточном фланге Южносопчинского массива

Одним из наиболее ярких свидетельств последовательности геологических событий в ЮСМ являются структурные взаимоотношения трех типов пород — метапироксенитов, метагаббродолеритов и метагабброноритов, зафиксированные в одном из коренных обнажений на восточном фланге массива. Здесь в коренном выходе пород площадью около  $6 \times 9$  м представлены обломки мелкозернистых метапироксенитов и тонкозернистых метагаббродолеритов (рис. 2).

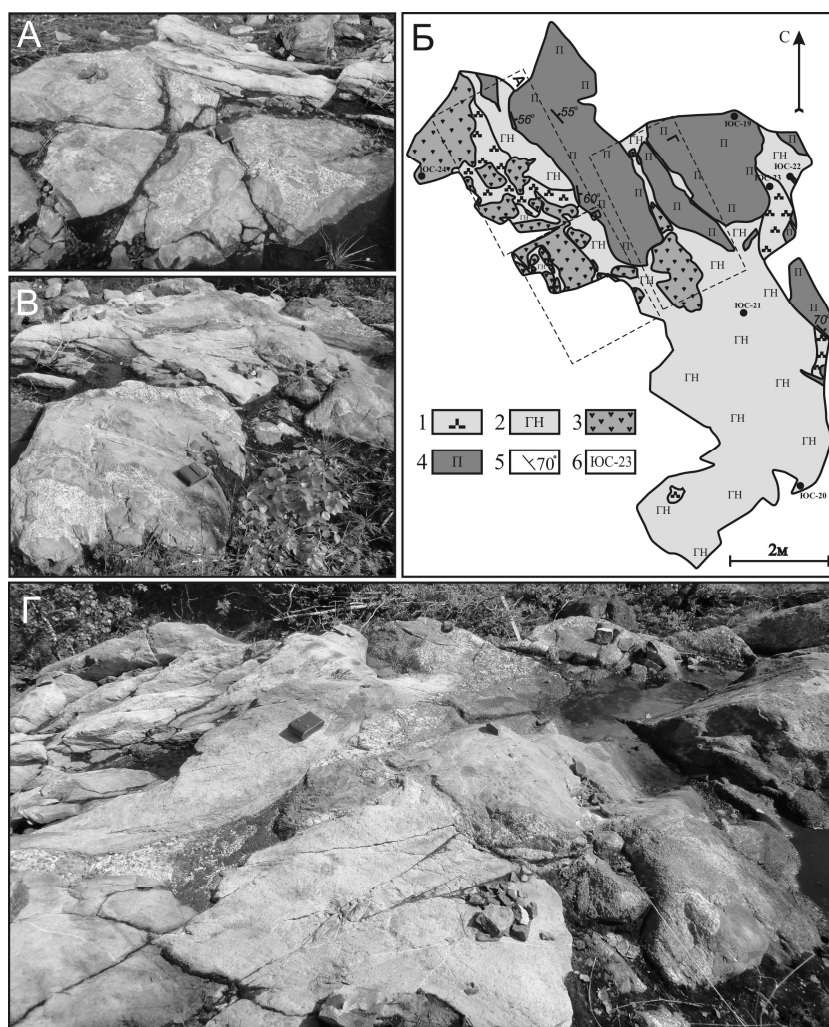


Рис. 2. Схема геологического строения и фото коренного обнажения «Дайка»:

1 — пегматоидные лейко-мезократовые метагаббронориты; 2 — крупнозернистые мезократовые метагаббронориты; 3 — тонкозернистые метагаббродолериты; 4 — среднезернистые метапироксениты; 5 — элементы залегания плоскостей контакта; 6 — номера образцов

Метагаббродолериты серого цвета, с зеленоватым оттенком представляют собой типичную дайковую породу. Дайки метагаббродолеритов такого типа широко распространены в Мончегорском комплексе и Мончетундровском массиве [4]. Как метапироксениты, так и метагаббродолериты разбиты на многочисленные обломки и сцементированы метагабброноритовым материалом. Размер обломков от нескольких сантиметров до первых метров. Метагаббронориты крупнозернистые, участками — пегматоидные. В центре данного обнажения видно, что фрагменты апофиза дайки заключены внутри трещины в крупном блоке метапироксенитов. Жила метагаббронорита, вероятно, проникла по той же трещине, в результате чего апофиз дайки был будинирован. Очевидно, что временной разрыв между внедрением пироксенитов и габброноритов был значительным, поскольку за этот период произошло остывание крупного магматического тела и внедрение даек по трещинам.

### **Интерпретация структурных взаимоотношений пород Южносопчинского массива по данным бурения скважины 1826**

Скважина 1826 пробурена ОАО «ЦКЭ» в ходе поисково-разведочных работ на платинометалльное оруденение в восточной части Мончегорского комплекса и расположена в центральной части ЮСМ (рис. 1, врезка).

Скважина пересекла зону контакта крупнозернистых габброноритов с серией пород, включающей пироксениты, нориты и оливиновые пироксениты. Первичная документация скважины выполнена геологом ОАО «Пана» А. А. Ефимовым. Опираясь на представления о структурных взаимоотношениях пород, полученные при исследовании коренных обнажений на поверхности, нами предложена интерпретация геологической колонки скважины (рис. 1).

На основании анализа послойной документации А. А. Ефимова и собственных петрографических исследований авторы статьи выделили в скважине 1826 следующие зоны:

0–3.5 — валунная морена;

3.5–8.1 — мезократовые габбронориты;

8.1–30.2 — нориты, ортопироксениты, дуниты, оливиновые нориты, гарцбургиты с подчиненными прослоями габброноритов, участками рассланцованные и метаморфизованные, с неравномерной магнетитовой вкрапленностью;

30.2–79.8 — габбронориты мезократовые, участками — габбро мезо-лейкократовые и плагиоклаз-амфиболовые породы по габброидам. В интервале 30.2–48.0 — равномерная сульфидная вкрапленность. В интервале 48.0–79.8 — редкая сульфидная вкрапленность. Породы интенсивно и неравномерно метаморфизованы, рассланцованы; 79.8–96.8 — *зона развития жильных тел*: нориты, ортопироксениты, насыщенные телами плагиоклаз-ортопироксеновых, плагиоклаз-амфиболовых, кварц-плагиоклазовых (с микропегматитами) жил, содержащих богатую гнездовую вкрапленность магнетита (до 60 %) и сульфидов (до 3–5 %);

96.8–128.6 — *зона брекчирования*: зона частого чередования пироксенитов и меланократовых норитов со средне-крупнозернистыми габброноритами (зона брекчирования). В интервалах 96.8–100.8 и 104.6–108.4 — в пироксенитах развита равномерная мелкая сульфидная вкрапленность до 2 %;

128.6–136.6 — *зона развития жильных тел*: нориты, ортопироксениты, насыщенные телами плагиоклаз-ортопироксеновых, плагиоклаз-амфиболовых, кварц-плагиоклазовых (с микропегматитами) жил; в интервале отмечается мелкая рассеянная сульфидная вкрапленность;

136.6–140.0 — *зона брекчирования*: зона частого чередования мелко-среднезернистых норитов и оливиновых норитов со средне-, крупнозернистыми мезократовыми габброноритами. Встречаются плагиоклаз-амфиболовые жилы с голубым кварцем и магнетитом. Породы неравномерно изменены, трещиноваты, содержат кварц-плагиоклазовые овоиды и жилки;

140.0–185.5 — *зона развития жильных тел*: нориты, ортопироксениты, оливиновые пироксениты с прослоями габброноритов и телами плагиоклаз-ортопироксеновых, плагиоклаз-



амфиболовых, кварц-плагиоклазовых (с микропегматитами) жил. Для интервала характерна мелкая рассеянная сульфидная вкрапленность;

185.5–212.6 — нориты, ортопироксениты, оливиновые нориты, гарцбургиты с прослоями габброноритов, метаморфизованные разности этих пород. Участками отмечается магнетитовая и мелкая сульфидная вкрапленность;

212.6–217.0 — нориты, ортопироксениты, дуниты, оливиновые нориты, гарцбургиты с подчиненными прослоями габброноритов, участками рассланцованные и метаморфизованные, с неравномерной магнетитовой и сульфидной вкрапленностью;

212.6–238.4 — нориты, ортопироксениты, дуниты, оливиновые нориты, гарцбургиты с подчиненными прослоями габброноритов, участками рассланцованные и метаморфизованные, с неравномерной рассеянной магнетитовой и сульфидной вкрапленностью.

Необходимо подчеркнуть, что ранее данные материалы интерпретировались как вскрытие скважиной 1826 верхней (существенно габброноритовой) и нижней (расслоенной) частей разреза ЮСМ. Однако, по мнению авторов настоящей статьи, в интервале от 79.8 до 185.5 м скважина вскрыла сложную зону контакта двух магматических фаз (габброноритового и норит-пироксенитового составов), в пределах которой широко развиты зоны брекчирования и тесно связанные с ними зоны распространения жильных тел различного состава.

### **Благороднометалльная минерализация в породах скважины 1826**

Согласно документации А. А. Ефимова и данным авторов статьи, скважина 1826 содержит неравномерную сульфидную вкрапленность по всему разрезу начиная с глубины 30.2 м. Наиболее густая вкрапленность приурочена к зонам развития жильных тел и к зонам брекчирования. В интервале 79.8–92.0 содержание сульфидов составляет до 3–5 %, в интервале 96.8–108.8 — до 2 %. Второй участок неравномерной, но участками более густой вкрапленности сульфидов приходится на интервал 159.8–170.7. Вкрапленность приурочена к норитам с многочисленными мелкими жилами плагиоклаз-амфиболового состава, жилами пегматоидов с кварцем и магнетитом. Здесь отмечены повышенные содержания элементов платиновой группы (ЭПГ). Таким образом, повышенное содержание ЭПГ приурочено к зоне контакта габброноритов с пироксенитами, причем в тесной связи с жильными образованиями. Наиболее значимые рудные интервалы с суммой ЭПГ до 0.8 г/т приходятся в скважине 1826 на интервал 161.3–173.1, который представлен норитами, ортопироксенитами, оливиновыми пироксенитами с прослоями габброноритов и жильными телами.

В одном из полированных аншлифов нами охарактеризованы выделения минералов благородных металлов (рис. 3). Порода представляет собой ортопироксенит, сложенный короткопризматическими кумулюсными зернами частично амфиболизированного ортопироксена и интеркумулюсными выделениями плагиоклаза. Сульфидно-оксидная рудная вкрапленность приурочена к интерстициям между зернами пироксена (рис. 3, А). Сульфиды и магнетит образуют компактные сростки (гнезда) мелких зерен, расположенных незакономерно, размер сростков — от долей до нескольких миллиметров (рис. 3, Б). Границы сростков преимущественно резкие. Сростки также насыщены зернами силикатных минералов, главным образом амфиболов. Минералы платиновых металлов (МПМ) и золото образуют единичные выделения внутри сульфидно-оксидных вкрапленников, сложенных магнетитом, пирротинном, халькопиритом и пентландитом (рис. 3, В–Ж). Выделения МПМ и золота имеют каплевидную или неправильную форму.

Помимо сульфидно-оксидных сростков, рудные минералы присутствуют в породе в виде отдельных мелких зерен размером несколько микрон, заполняя интерстиции между зернами силикатов. В сростании с мелкими удлинёнными выделениями магнетита среди силикатов находится выделение смеси нескольких фаз МПМ размером около 2 мкм (рис. 3, В<sub>1</sub>).

Выделения МПМ и золота имеют размер не более 1–2 мкм. Малый размер частиц не позволил провести их анализ на электронном микроскопе. Оценка химического состава минералов выполнена на сканирующем электронном микроскопе LEO1450 с помощью

энергодисперсионного анализатора Quantax200. Состав проанализированных минералов представлен в таблице ниже. Наиболее распространены выделения котульскита, мончеита и золота; брэггит, меренскиит, сперрилит, ирарсит встречаются реже. Характерной особенностью сульфидной и благороднометалльной минерализации в данных породах является постоянное присутствие магнетита. Включения МПМ и золота в магнетите встречаются так же часто, как и в сульфидах.

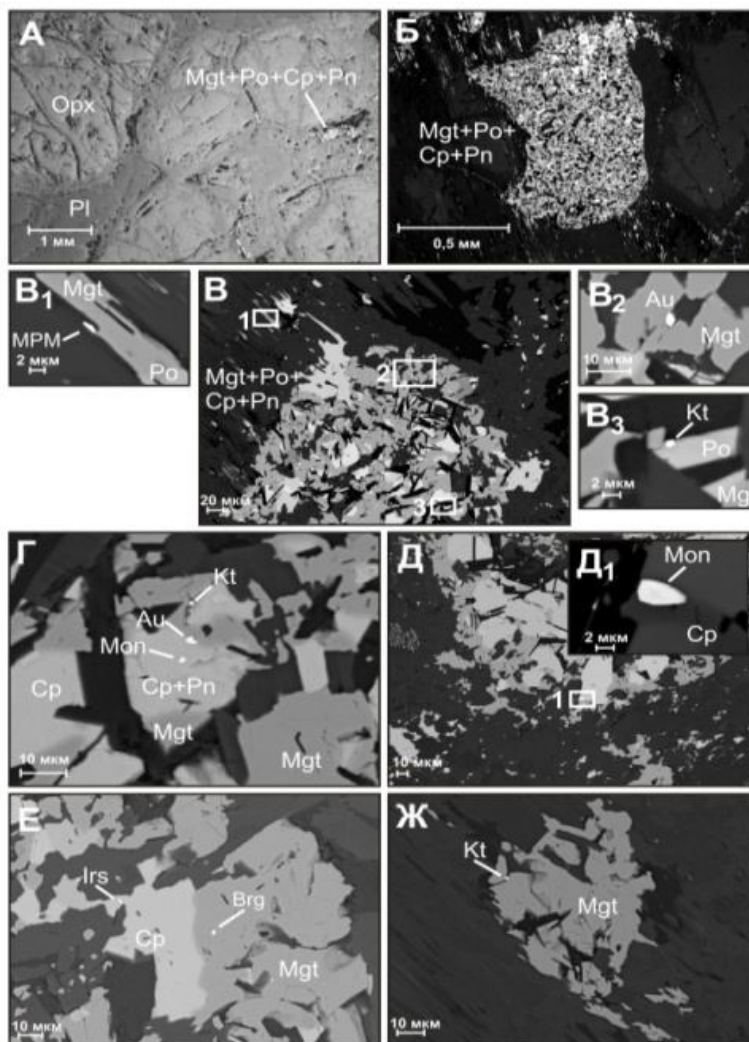


Рис. 3. Морфология рудной вкрапленности и выделения МПМ в аншлифе 1826/144.9:

*А* — плагиоклазовый ортопироксенит с сульфидной и оксидной вкрапленностью; *Б* — сульфидно-оксидный вкрапленник в породе; *В* — сульфидно-оксидный вкрапленник с выделениями золота и МПМ; *В<sub>1</sub>* — смесь МПМ в магнетите (анализ № 11 в табл.); *В<sub>2</sub>* — золото в магнетите (анализ № 1 в табл.); *В<sub>3</sub>* — котульскит в пирротине (анализ № 3 в табл.); *Г* — сульфидно-оксидный вкрапленник с выделениями золота (анализ № 2 в табл.), котульскита (анализ № 4 в табл.) и мончеита (анализ № 5 в табл.); *Д* — сульфидно-оксидный вкрапленник с выделением мончеита в халькопирите (анализ № 6 в табл.); *Е* — выделения брэггита в магнетите (анализ № 9 в табл.) и ирарсита в халькопирите (анализ № 10 в табл.); *Ж* — выделение котульскита в магнетитовом вкрапленнике. *А, Б* — снимки полированного аншлифа в отраженном свете; *В–Ж* — снимки в обратно-рассеянных электронах (BSE-изображения). *Pl* — плагиоклаз, *Orpx* — ортопироксен, *Mgt* — магнетит, *Po* — пирротин, *Cr* — халькопирит, *Pn* — пентландит, *Au* — золото, *Kt* — котульскит, *Mon* — мончеит, *Irs* — ирарсит, *MPM* — смесь минералов платиновых металлов

Минералы благородных металлов в образце 1826/144.9

Элемент	1	2	3	4	5	6
Fe	4.93	15.06		7.48		
Ni	0.14					
Cu		4.72				
Ag	6.40	15.93				
Au	84.19	59.29				
Pt			2.80		40.15	35.32
Pd	4.34		36.83	36.92		
Rh						
Ir						
S		5.00				
Te			30.17	30.12	41.24	38.25
Bi			30.20	25.49	18.61	26.43
As						

Окончание таблицы

Элемент	7	8	9	10	11	12
Fe	4.36		8.08	8.70		27.75
Ni			5.45			0.18
Cu				7.23		
Ag					11.98	
Au					21.95	
Pt	52.41	12.49	51.07			
Pd		18.47	19.27		44.49	50.53
Rh				4.47		
Ir				40.32		
S			16.13	11.28		
Te		61.03				4.66
Bi		8.01				5.69
As	43.23			28.01		10.46
Sn					8.73	
Pb					12.85	
Al						0.74
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.01	100.00	100.00

*Примечания:* 1 — золото; 2 — золото с примесью серебра и халькопирита; 3, 4 — котульскит; 5, 6 — мончеит; 7 — сперрилит; 8 — меренскиит; 9 — бреггит; 10 — ирарсит; 11 — смесь минеральных фаз; 12 — смесь минеральных фаз (котульскит и палладоарсенид?)

Оценка состава минеральных фаз выполнена при помощи энергодисперсионной приставки Quantax200 к сканирующему электронному микроскопу Leo-1450 (аналитик — А. В. Базай), суммарное содержание элементов приведено к 100 %.

## Заключение

Таким образом, исследования авторов настоящей статьи позволили сделать ряд достаточно важных выводов. В коренных обнажениях и в разрезе скважины 1826 подтверждается весьма сложный характер структурных взаимоотношений между главными породными разновидностями — интенсивно метаморфизованными габброноритами, норитами, пироксенитами. Хорошо видно, что эти взаимоотношения (наличие обломков пироксенитов и долеритов в габброноритовом цементе, развитие в зоне контакта пегматоидных и жильных образований) не позволяют говорить о наличии в ЮСМ классической магматической расслоенности. Этот вывод косвенно подтверждает и весьма неравномерное (сквозное) распределение в разрезе скважины 1826 пород, содержащих оливин (от верхних до нижних частей разреза). Разрыв между внедрениями двух фаз, по всей вероятности, был довольно существенным, так как внедрение габброноритовой фазы произошло позже образования даек метагаббродолеритов. Геологические наблюдения подтверждаются геохронологическими определениями [2].

Важным наблюдением является приуроченность к зоне контакта сульфидно-оксидной и ЭПГ минерализации в связи с широким развитием жильных тел. Оно может говорить о том, что минерализация, вероятнее всего, имеет контактовую природу и признаки последующего переотложения в процессе жилобразования.

В заключение следует подчеркнуть, что данные исследования проведены на ограниченном материале. Для окончательных выводов требуются более масштабные картировочные и буровые работы с применением всего комплекса современных аналитических методов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Геологическое строение, минералогия и генезис ЭПГ-минерализации массива Южная Сопча, Мончегорский комплекс, Россия / Т. Л. Гроховская [и др.] // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54, № 5. С. 416–440.
2. Малосульфидные платинометалльные руды палеопротерозойского Мончегорского плутона и его южного обрамления (Кольский полуостров, Россия): геологическая характеристика и изотопно-геохронологические свидетельства полихронности рудно-магматических систем / В. В. Чащин [и др.] // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58, № 1. С. 41–63.
3. Геологическое строение и особенности локализации платинометалльного оруденения в восточной части Южносопчинского мафит-ультрамафитового массива (Кольский полуостров) / Т. В. Рундквист [и др.] // Руды и металлы. 2011. № 5. С. 58–68.
4. Арзамасцев А. А., Федотов Ж. А., Арзамасцева Л. В. Дайковый магматизм северо-восточной части Балтийского щита. СПб.: Наука, 2009. 383 с.

## Сведения об авторах

*Рундквист Татьяна Васильевна* — кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по науке Геологического института КНЦ РАН

E-mail: rund@geoksc.apatity.ru

*Припачкин Павел Валентинович* — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: paul@geoksc.apatity.ru

*Мирошникова Яна Андреевна* — младший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: rund@geoksc.apatity.ru

*Базай Айя Валерьевна* — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН, младший научный сотрудник Центра наноматериалов КНЦ РАН

E-mail: a.bazai@mail.ru

## Author Affiliation

*Tatyana V. Rundkvist* — PhD (Geology & Mineralogy), Vice Director on Science of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: rund@geoksc.apatity.ru

*Paul V. Pripachkin* — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: paul@geoksc.apatity.ru

*Yana A. Miroshnikova* — Junior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: rund@geoksc.apatity.ru

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

Junior Researcher of the Nanomaterial Centre (NMC) of the KSC of the RAS

E-mail: a.bazai@mail.ru

### **Библиографическое описание статьи**

Новые данные о геологическом строении и благороднометалльной минерализации Южносопчинского массива (раннепротерозойский Мончегорский комплекс, Кольский регион) / *Т. В. Рундквист [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 3 (26). — С. 44–52.

### **Reference**

*Rundkvist Tatyana V., Pripachkin Paul V., Miroshnikova Yana A., Bazay Aya V.* New Data on Geological Structure and Noble Metal Mineralization in the Yuzhnosopchinsky Massif (Early Proterozoic Monchegorsky Complex, Kola Region). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 3, pp. 44–52. (In Russ.).

УДК 622.778

## ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ТИПОВ РУД И ПОРОД КОЛВИЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ КУСКОВОГО ОБОГАЩЕНИЯ

С. В. Терещенко<sup>1</sup>, Е. Г. Веселова<sup>1</sup>, С. А. Алексеева<sup>1</sup>, Е. В. Черноусенко<sup>1</sup>,  
Ю. Н. Нерадовский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

<sup>2</sup>ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

### Аннотация

Проведено измерение магнитной восприимчивости kernового и штуфного материала титаномагнетитовых руд Колвицкого месторождения. Установлена взаимосвязь магнитных свойств и вещественного состава типов руд и пород. Выявлены предпосылки применения предварительного кускового разделения, которые могут быть использованы при разработке технологии обогащения данных руд.

### Ключевые слова:

*титаномагнетитовые руды, магнитная восприимчивость, вещественный состав, кусковое обогащение.*

## STUDY OF MAGNETIC PROPERTIES OF ORE TYPES AND ROCKS FROM THE KOLVITSKOE DEPOSIT FOR ESTIMATING POTENTIAL OF LUMPY BENEFICATION

Sergei V. Tereshchenko<sup>1</sup>, Elena G. Veselova<sup>1</sup>, Svetlana A. Alekseeva<sup>1</sup>,  
Elena V. Chernousenko<sup>1</sup>, Yury N. Neradovsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mining Institute of the KSC of the RAS

<sup>2</sup>Geological Institute of the KSC of the RAS

### Abstract

The authors have performed a measurement of magnetic susceptibility of core and lump samples from the Kolvitskoe deposit of titanium-magnetite ores. Interrelation between magnetic properties and material composition of ore types and rocks has been identified. Preconditions have been revealed for applying preliminary lumpy separation which can be used when designing a beneficiation technology for the ores given.

### Keywords:

*titanium-magnetite ores, magnetic properties, material composition, lumpy separation.*

Современный рост объемов потребления железорудного сырья приводит к необходимости все шире использовать труднообогатимые руды сложного вещественного состава, характеризующиеся низким содержанием ценных компонентов, тонкой вкрапленностью и близкими технологическими свойствами. К подобному типу сырья относятся титаномагнетитовые руды, большими запасами которых обладает Россия. Эти руды являются комплексными и содержат железо и титан, их промышленную ценность повышает наличие в них ванадия, который во многих случаях относится к основным компонентам руды. Кроме того, в ряде месторождений выявлены извлекаемые количества меди, кобальта, никеля, золота, платины и др.

Руды Колвицкого месторождения относятся к числу перспективных месторождений по ресурсам титаномагнетитов Кольского полуострова. Месторождение расположено в южной части Мурманской области, в 50 км к востоку от г. Кандалакша. Впервые жилы сплошных титаномагнетитовых руд были обнаружены в 1966 г. при проверке магнито- и гравиразведочных аномалий, что послужило основанием для постановки поисковых геолого-физических работ.

Руды располагаются в клинопироксенитах и верлитах, текстура руд в основном полосчатая, структура вкрапленная, массивная. По содержанию титаномагнетита выделяются: бедные — 30%, средние — 30–50 %, богатые вкрапленные — 50–80 % и сплошные руды > 80 % [1].

Для изучения возможности применения кускового магнитного обогащения данного сырья проведено измерение магнитной восприимчивости на материале малообъемной пробы, представленной кернами и штуфами крупностью -60 мм. По результатам исследований выделены несколько фракций.

Фракция с магнитной восприимчивостью  $\chi = 0-200$  представлена породами, которые являются вмещающими для ильменит-титаномагнетитовых руд Колвицкого месторождения. Это пироксениты, на долю которых приходится около 70–80 %, оливиниты — ориентировочно 10–15 % и кристаллические сланцы основного состава — 15–20 %. Рудные минералы представлены титаномагнетитом (до 5 %), сульфидами (1–2 %) и ильменитом (до 5 %).

Фракция с магнитной восприимчивостью  $\chi = 200-500$ . Здесь аккумулируются преимущественно средние по содержанию титаномагнетита (30–50 %) и богатые (50–80 %) руды (рис. 1, а, б). В основном это образцы с полосчатой текстурой, где выраженные полосы богатовкрапленных и сплошных руд перемежаются с полосами слабо оруденелой породы.

Фракция с магнитной восприимчивостью  $\chi > 500$  представлена в основном сплошными рудами (> 80 % рудных минералов; рис. 1, в).

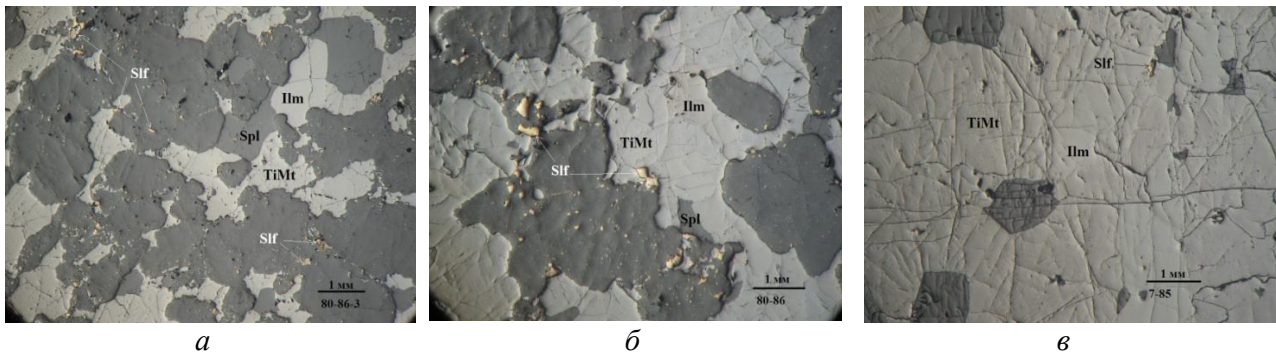


Рис. 1. Структура основных типов руд:

а — средняя вкрапленная; б — богатая вкрапленная; в — сплошная

Фото аншлифа в отраженном свете. Условные обозначения:

TiMt — титаномагнетит; Ilm — ильменит; Spl — шпинель; Sif — сульфиды

Структура во вкрапленных рудах преимущественно сидеронитовая, в сплошных рудах — зернистая.

Силикатные минералы во всех фракциях представлены преимущественно клинопироксеном, присутствует также оливин, роговая обманка, слюда. Несиликатная примесь представлена зеленой шпинелью. Она встречается во всех типах руд, содержание ее колеблется от единичных зерен (в породах), 1–1.5 % (в бедных и средних вкрапленных рудах) до 5–10 % в богатых вкрапленных и сплошных рудах.

Во вкрапленных рудах основным нерудным минералом является клинопироксен (20–45 %), в сплошных рудах пироксен и другие силикаты находятся в подчиненном количестве (0–2 %), а основная примесь (5–10 %) представлена зеленой шпинелью, образующей идиоморфные вкрапленники на фоне зернистой массы титаномагнетита. Размер вкрапленников шпинели составляет 0.5–1.0 мм.

Сульфиды встречаются во всех породах и типах руд. Содержание сульфидов варьирует от единичных зерен до 2–5 % в отдельных аншлифах образцов вкрапленных руд. Наименьшее количество сульфидов (0.5–1.5 %) отмечено в образцах сплошных руд. Во вкрапленных рудах они преимущественно связаны с пироксенами. Сульфиды или рассыпаны в виде тонкой (от 2–5

до 30–50 мкм) вкрапленности во всем объеме зерна (рис. 2, *a*), или в виде гипидиоморфных и ксеноморфных выделений располагаются по границам зерен пироксена на контакте их с титаномагнетитом (рис. 2, *б*). Непосредственно в зернах титаномагнетита сульфиды встречаются редко, в виде округлых единичных включений (рис. 2, *в*).

В сплошных рудах сульфидная вкрапленность в основном располагается в зернах шпинели или на границе шпинели и рудных минералов (рис. 3, *a*), а также довольно часто встречается в виде индивидуальных включений размером 0.05–0.3 мм в межзерновом пространстве титаномагнетита (рис. 3, *б*). Сульфидные включения в пироксенах (рис. 3, *в*) присутствуют редко, так как доля пироксенов в сплошных рудах, как было отмечено выше, обычно невелика.

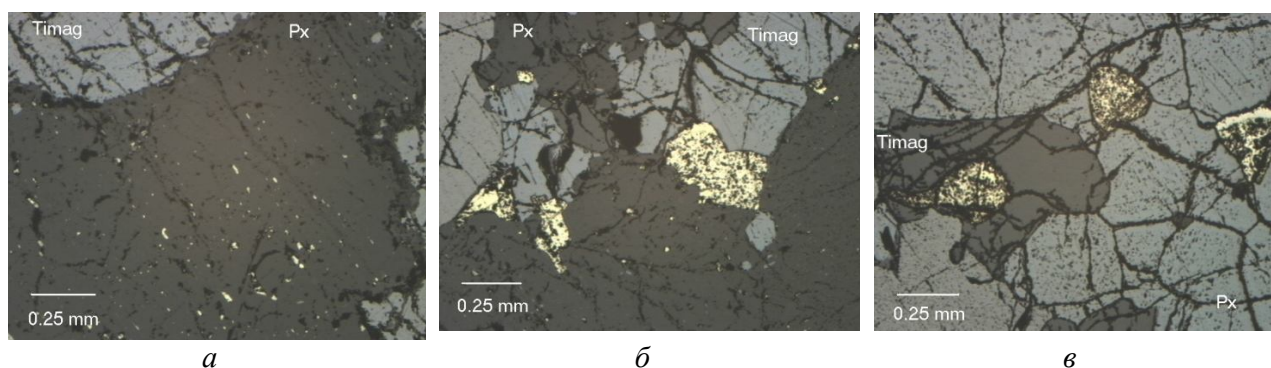


Рис. 2. Морфология и локализация сульфидных минералов во вкрапленных рудах: *a* — микровключения в пироксенах; *б* — ксеноморфные зерна, расположенные на границе пироксена и титаномагнетита; *в* — включения в титаномагнетите. Условные обозначения: Timag — титаномагнетит; Px — пироксен

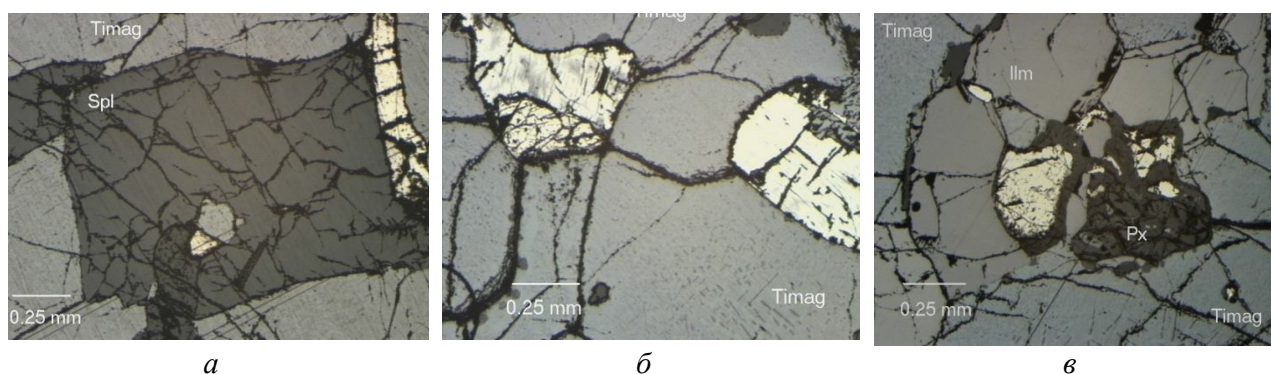


Рис. 3. Морфология и локализация сульфидной вкрапленности в сплошных рудах: *a* — на границе шпинели и титаномагнетита; *б* — включения в титаномагнетите; *в* — включения в пироксене. Условные обозначения: Timag — титаномагнетит; Px — пироксен; Ilm — ильменит; Spl — шпинель

Проведенными исследованиями показано, что во фракции с магнитной восприимчивостью более  $500 \cdot 10^{-4}$  ед. СИ аккумулируются в основном сплошные руды с содержанием титаномагнетита 75–95 %, ильменита — 0–20 %. Фракция с магнитной восприимчивостью  $200\text{--}500 \cdot 10^{-4}$  ед. СИ объединяет преимущественно средние и богатые вкрапленные руды. В средних рудах содержание титаномагнетита составляет 35–45 %, ильменита — 0–10 %; в богатых — 45–75 % и 0–25 % соответственно. Во фракции, имеющей магнитную восприимчивость менее  $200 \cdot 10^{-4}$  ед. СИ, сосредоточены вмещающие породы, представленные пироксенитами, оливинитами и кристаллическими сланцами плагиоклаз-гранат-пироксенового состава. По содержанию рудных минералов титаномагнетита и ильменита (0–5 %) этот продукт в целом можно отнести к хвостам обогащения.



Таким образом, в результате исследований выявлены предпосылки применения предварительного кускового разделения, которые могут быть использованы при разработке технологии обогащения данных руд.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Колвицкое месторождение (геология, вещественный состав руд) / Ю. Л. Войтеховский [и др.] // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2014. Вып. №2, т. 17. С. 271–278.

#### Сведения об авторах

*Терещенко Сергей Васильевич* — доктор технических наук, заведующий лабораторией Горного института КНЦ РАН

E-mail: [tereshchenko@goi.kolasc.net.ru](mailto:tereshchenko@goi.kolasc.net.ru)

*Веселова Елена Геннадьевна* — технолог I категории Горного института КНЦ РАН

E-mail: [science-veselova2012@yandex.ru](mailto:science-veselova2012@yandex.ru)

*Алексеева Светлана Александровна* — научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: [alekseeva@goi.kolasc.net.ru](mailto:alekseeva@goi.kolasc.net.ru)

*Черноусенко Елена Владимировна* — научный сотрудник Горного института КНЦ РАН

E-mail: [chern@goi.kolasc.net.ru](mailto:chern@goi.kolasc.net.ru)

*Нерадовский Юрий Николаевич* — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: [nerad@geoksc.apatity.ru](mailto:nerad@geoksc.apatity.ru)

*Sergei V. Tereshchenko* — Dr. Sci. (Engineering), Head of Laboratory of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: [tereshchenko@goi.kolasc.net.ru](mailto:tereshchenko@goi.kolasc.net.ru)

*Elena G. Veselova* — Technologist of the First Category of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: [science-veselova2012@yandex.ru](mailto:science-veselova2012@yandex.ru)

*Svetlana A. Alekseeva* — Researcher of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: [alekseeva@goi.kolasc.net.ru](mailto:alekseeva@goi.kolasc.net.ru)

*Elena V. Chernousenko* — Researcher of the Mining Institute of the KSC of the RAS

E-mail: [chern@goi.kolasc.net.ru](mailto:chern@goi.kolasc.net.ru)

*Yury N. Neradovsky* — PhD (Geology & Mineralogy), Leading Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: [nerad@geoksc.apatity.ru](mailto:nerad@geoksc.apatity.ru)

#### Библиографическое описание статьи

Изучение магнитных свойств типов руд и пород Колвицкого месторождения для оценки возможности кускового обогащения / С. В. Терещенко [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 3 (26). — С. 53–56.

#### Reference

*Tereshchenko Sergei V., Veselova Elena G., Alekseeva Svetlana A., Chernousenko Elena V., Neradovsky Yury N.* Study of Magnetic Properties of Ore Types And Rocks from the Kolvitskoe Deposit for Estimating Potential of Lumpy Benefication. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 3 (26), pp. 53–56. (In Russ.).

УДК 594.1 (268.45)

## ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ\*

А. Г. Дворецкий, В. Г. Дворецкий

ФГБУН Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН

### Аннотация

Обобщены сведения по биологии потенциальных объектов для аквакультуры в Баренцевом море — двустворчатых моллюсков *Mytilus edulis* и *Chlamys islandica*. Представлены сведения об имеющихся наработках в сфере искусственного выращивания данных видов. Сложности с организацией стабильно работающих предприятий по выращиванию моллюсков связаны с длительным периодом окупаемости финансовых вложений.

### Ключевые слова:

*двустворчатые моллюски, Баренцево море, культивирование.*

## PROBLEMS AND PERSPECTIVES OF THE BIVALVE MOLLUSKS AQUACULTURE IN THE BARENTS SEA

Alexander G. Dvoretsky, Vladimir G. Dvoretsky

Murmansk Marine Biological Institute of the KSC of the RAS

### Abstract

We have summarized information on the biology of two potential aquaculture objects for the Barents Sea, namely bivalve mollusks *Mytilus edulis* and *Chlamys islandica*. The information, concerning modern aquaculture techniques, is presented for the mentioned species. Difficulties in organizing the stable aqua farming are associated with relatively high return period for financial investments in this area.

### Keywords:

*bivalve mollusks, Barents Sea, aquaculture.*



Увеличение антропогенного пресса на водоемы, перелов многих промысловых гидробионтов имеют своим следствием сокращение естественных ресурсов рыб и водных беспозвоночных. В полной мере это относится к арктическим морям, где в последние десятилетия XX в. в неудовлетворительном состоянии оказались запасы многих видов промысловых рыб: сельди, мойвы, атлантического лосося, большинства сиговых и др. В связи с кризисными явлениями в популяциях главных промысловых объектов усилилось давление промысловиков на "дополнительные" объекты промысла: пикшу, морского окуня, камбаловых рыб. В традиционных местах промысла резко сократилась площадь зарослей бурых водорослей. Кризисные явления охватили поселения моллюсков. В Белом море отмечаются случаи гибели мидиевых банок. Практически нерентабельным стал промысел гребешков [1].

Резкое сокращение биоресурсов обуславливает необходимость развития аквакультуры, под которой понимается получение биологической продукции путем культивирования

---

\*Работа выполнена за счет Программы Президиума РАН I.32П "Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации" в рамках темы "Биоресурсы арктических морей России: современное состояние, влияние природных изменений и антропогенных воздействий, научные основы и перспективы использования.

(выращивания) водных организмов — гидробионтов [1]. В настоящее время марикультура двустворчатых моллюсков в Баренцевом море делает первые шаги, хотя, например для Белого моря, детально разработаны методики культивирования мидий [1].

В представленном обзоре даются краткие сведения по биологии потенциальных объектов аквакультуры, относящихся к двустворчатым моллюскам (мидия съедобная и исландский гребешок), и обобщаются имеющиеся наработки российских ученых, которые могут быть полезны при организации акваферм, направленных на выращивание ценных промысловых видов гидробионтов.

Мидия *Mytilus edulis* L. (рис. 1) является одним из наиболее распространенных донных беспозвоночных побережья Баренцева и Белого морей. На каменистых и скальных грунтах литоральной зоны, а иногда и в сублиторали, эти моллюски становятся доминирующим или характерным видом многих биоценозов. Их биомасса составляет порой несколько килограммов на 1 м<sup>2</sup>. Эврибионтность, доступность сбора, хорошая скорость роста, простота выращивания и вкусовые качества мяса сделали мидий с давних пор объектом промысла и культивирования, в том числе и на Севере. Опыт экспериментального выращивания на Восточном Мурмане показал их несомненную перспективность для полярной аквакультуры [2].



Рис. 1. Мидия *Mytilus edulis*

Мидии обладают очень высокой толерантностью к колебаниям факторов среды. Взрослые особи способны в течение нескольких часов осушения переносить температуры от -15 до +30 °С [3] и соленость от 2.4 до 50 ‰ [2], но в воде с содержанием солей менее 5 ‰, не имея предварительной адаптации, довольно быстро погибают [3].

Тело мидии заключено в выпуклую раковину, состоящую из двух практически равных створок треугольно-овальной формы. Раковина темно-оливковая, темно-коричневая, чаще черная. Нередко рисунок раковины дополняют чередующиеся темные и светлые радиальные полосы, особенно хорошо заметные на просвет створок светлых тонов.

Форма и цвет раковины варьируют в зависимости от мест обитания. Передний конец раковины совпадает с макушкой и немного заострен. Это составляет отличительную особенность мидий. Брюшной край створок прямой или слабоизогнутый, спинной край сильно изогнут. Задний конец раковины равномерно закруглен. Замочный край без зубов, но часто под макушкой имеется несколько мелких зубчиков.

Тело мидии состоит из туловища и небольшой ноги. Головной отдел полностью редуцирован. На переднем конце туловища лежит рот, на заднем — порошица. Туловище покрыто большими боковыми складками — мантией. Они отходят от передней части туловища, охватывают все тело и срастаются на спине. Пространство между складками и туловищем носит название мантийной полости, где расположены жабры и органы пищеварительной, кровеносной, выделительной, половой и нервной систем мидии. Сзади находится небольшой выводной сифон, через который вода выходит из мантийной полости. Сквозь мантию проходят мускулы-аддукторы раковины и нога. Биссус, при помощи которого моллюск прикрепляется к субстрату, представляет собой тонкие прочные нити рогоподобного вещества. Биссусная железа, выделяющая эти нити, находится в основании ноги. Жабры расположены в задней половине тела и представлены жаберной осью с жаберными нитями. Жабры не только обеспечивают ток воды, но и являются фильтрующим органом. Приносимые частицы взвеси сортируются здесь по размеру и качеству. Непригодные к поглощению частицы направляются к выводному сифону и удаляются из организма в виде оформленных тяжей — псевдофекалий. Кровеносная система мидий незамкнутая и состоит из сердца, сети артериальных сосудов, венозных каналов, лакун и синусов. Сердце делает около 30 сокращений в минуту.

Половой диморфизм не выражен. Определение пола возможно лишь в период размножения. Самцы отличаются от самок только по цвету зрелой гонады: у самцов — кремово-белая, у самок — оранжевая.

Исследование процессов размножения и раннего онтогенеза мидий имеет первостепенное значение как для организации рационального промысла, так и для их успешного культивирования.

В своем развитии мидия проходит через три основные стадии: яйцо, личинка и собственно особь. Половозрелые особи мидий выметывают яйцеклетки и сперматозоиды в воду, где и происходит оплодотворение. В среднем один вымет у беломорских мидий длится около 1 ч [4]. Яйца, имевшие до вымета неправильно-овальную форму, в воде становятся шарообразными. Первыми начинают вымет самки, хотя Т. А. Матвеева (1948) отмечает, что находившиеся в ванне самцы первые выпустили сперму, а самки начали вымет лишь через несколько часов [5].

Плодовитость одной мидии варьирует от 5 до 12 млн яиц, которые при благоприятных условиях самка может выметать за 15 мин [6]. В. В. Кузнецов и Т. А. Матвеева (1948) отмечали начало процесса созревания половых продуктов мидий в марте, а готовность самок литоральных мидий Восточного Мурмана к размножению с мая по октябрь [7]. По их данным, каждая половозрелая самка может выметать от 100 тыс. до 3 млн яиц в течение этого периода. Наблюдения за нерестом мидий показали, что вымет половых продуктов происходит не сразу, а обычно растянут во времени и осуществляется порционно, в несколько сроков, перемежаясь промежутками покоя [5, 8].

Половозрелости мидии достигают на литорали Баренцева моря при размерах 18–20 мм в возрасте 5–6 лет, хотя отдельные особи со зрелыми гонадами попадают и у литоральных мидий четырехлетнего возраста 13–15 мм длиной [5]. По другим данным, литоральные мидии Восточного Мурмана достигают длины 13–15 мм в возрасте 2 лет [9], 3 лет в условиях разной температурно-приливной динамики, 1–2 лет в нижних горизонтах литорали [10] и при содержании в садках [8, 11]. Половозрелые литоральные мидии губы Зеленецкая Западная имели длину раковины 17–33 мм [12].

Вклад каждой особи в размножение популяции зависит от ее размеров. Индивидуальная плодовитость моллюсков увеличивается с увеличением размера животного в кубической зависимости.

Оседание личинок происходит при длине раковины около 300–350 мкм. Личинка вырастает до таких размеров за 3–5 недель в зависимости от условий существования популяции.

Оседание личинок на коллекторы в губе Зеленецкая Западная отмечено в конце первой декады августа, сначала в приповерхностном слое. В середине августа спат покрывал пластины на всех горизонтах (до 3 м), но его наибольшая плотность отмечена на глубине 1 м (50–85 экз. на пластину) [13].

В губе Дальнезеленецкая осевшие в августе личинки мидий длиной около 2 мм были представлены в большом количестве (от 50 до 120 тыс. экз. на 1 м<sup>2</sup>) на слоевищах водорослей, но не встречались на илисто-песчаном грунте литорали бухты Дальний Пляж [5].

Первичное оседание личинок происходит обычно вблизи мидиевых поселений, но в основном на субстрате, не занятом взрослыми моллюсками: на нитчатых водорослях, гидроидах, раковинах усонюгих рачков-балянусов. Личинки, осевшие на нитчатые водоросли, гидроиды и другие субстраты, проводят на них около месяца и достигают 1–2 мм в длину [2].

Лучшая пища для личинок — жгутиковые водоросли, кроме того, они потребляют мелкий свежий макрофитный детрит, бактериопланктон и растворенное органическое вещество. Скорость фильтрации пищевых частиц у личинок мидий составляет при достаточном кормлении 11.4 мкл/ч-экз. и уменьшается при очень высоких (более 200 кл/мкл) концентрациях водорослей [2].

Если на первом этапе оседание личинок *M. edulis* является преимущественно гидродинамическим, пассивным процессом ("первичное осаждение"), то на конечном этапе место прикрепления личинок определяется как их активным поиском, так и локальными условиями биотопа. Особое значение для ориентации личинок в период оседания имеет качество субстрата. При отсутствии подходящего субстрата личинки задерживают метаморфоз и остаются в планктоне [2].

Установлено, что в период оседания личинка воспринимает определенные свойства субстрата, такие как его текстура, цвет, освещенность, пространственное расположение [14]. Субстрат, покрытый бактериально-водорослевой пленкой, наиболее привлекателен для личинок мидий [15], причем личинка может реагировать не на сам водорослевый субстрат, а на вещества, выделяемые им в воду [16]. Это обстоятельство учитывается в марикультуре мидии при определении времени постановки коллекторов. На коллекторах, выставленных перед самым нерестом, были отмечены лишь единичные особи. А наибольшее количество личинок оседает на коллекторы, установленные заблаговременно, за 6–9 месяцев до нереста. За это время материал коллекторов не только покрывается определенным ценозом обрастания, но, очевидно, также освобождается от значительной доли химических веществ, пропитывающих искусственные материалы [8].

Шансы молоди на выживание существенно повышаются при осаждении в друзах взрослых особей своего вида.

Линейный рост моллюсков хорошо аппроксимируется уравнениями Гомперца и Берталанфи. Уравнение Берталанфи основано на предположении, что скорость роста определяется разностью между конечным размером животного и его размером в данный момент. Для sublitorальных мидий Воронки Белого моря это уравнение [17] имело вид:

$$L = 76.4 \cdot (1 - e^{-0.171 \cdot t}),$$

где  $L$  — длина раковины (мм) в возрасте  $t$  (годы);  $e$  — основание натурального логарифма.

Кривая роста мидий среднего горизонта литорали губы Зеленецкая Западная [12] также описана уравнением Берталанфи:

$$L = 69 (1 - e^{-0.175 \cdot t}).$$

Вместе с тем у мидий наблюдаются большие индивидуальные отклонения в величине годового прироста начиная уже с первых лет жизни.

Скорость роста моллюсков зависит не только от совокупности абиотических условий, связанных с положением вида в ареале, но в большой степени от локальных трофических условий. Сравнительное исследование [11] роста литоральных мидий, помещенных в проточный аквариум, где в рационе доминировал детрит, и в подвесные садки на акватории губы Дальнезеленецкая, выявило значимость трофического фактора для роста баренцевоморских мидий (рис. 2). Хотя в аквариум непрерывно поступала вода из придонного слоя верхней сублиторали, содержащая большое количество детрита, количество фитопланктона в нем было обычно в 2 раза меньше, чем в губе. В садках условия питания были лучше, и скорость роста, соответственно, выше, несмотря на то что среднегодовая температура воды в аквариуме была в среднем на 1 °С выше, чем в губе. В благоприятных трофических условиях скорость роста баренцевоморских мидий может быть достаточно высока даже в условиях низких температур (1.5–2 °С).

Культивирование двустворчатых моллюсков обычно состоит из четырех основных этапов: 1) обследование маточного стада — естественных или искусственных маточных банок со зрелыми производителями; 2) получение от них посадочного материала (приплод, молодь или спат); 3) выращивание его до товарных кондиций; 4) сбор урожая с оставлением его части для пополнения маточного стада.

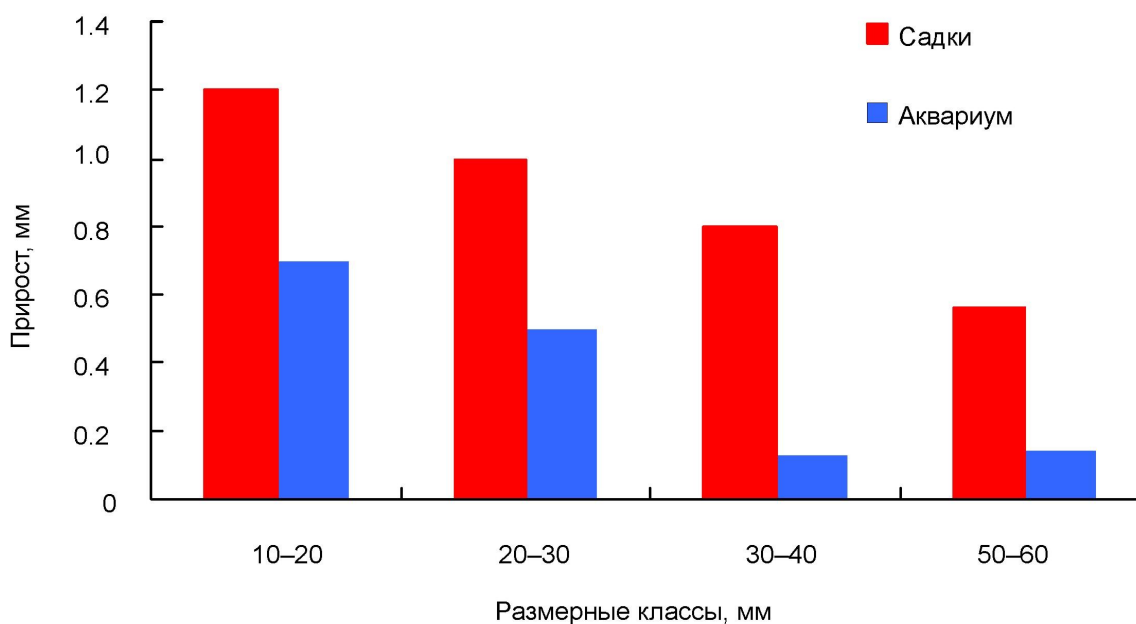


Рис. 2. Среднемесячный прирост литоральных мидий за годовой период содержания в садках и в проточных аквариумах [2]

Использование мидий происходит по трем основным направлениям: пищевому (кулинарное и кормовое), фармацевтическому (получение ценных биологически активных препаратов) и научно-прикладному (мониторинг, биотестирование).

Мировая добыча мидий составляет в среднем около 60–80 тыс. т в год, причем около 50 % добычи сосредоточено в водах Северной Атлантики, где ведут промысел 13 европейских стран.

Установлено, что состав мяса мидий зависит от условий ее местообитания и сезона. Содержание влаги варьирует от 45 до 90 %, белка — от 7 до 11 %, жира — от 0.5 до 1.6 %, углеводов — от 0.2 до 3.5 %, минеральных солей — от 1 до 2 %. В мясе содержатся в заметном количестве витамины группы В, витамин D, более 30 микроэлементов. В белке мидий

содержатся все незаменимые аминокислоты, но в большем количестве, чем в яйце. Биологически активные вещества (БАВ), содержащиеся в теле мидий, содействуют улучшению обмена веществ, обладают тонизирующим действием [18]. Удельное содержание мягких тканей тела (мяса) зависит от размеров и возраста мидий и составляет 10–22 % общей массы раковины для крупных и 16–30 % для мелких моллюсков.

Жирнокислотный состав липидов, выделенных из мяса беломорских мидий, характеризовался наличием значительных количеств полиеновых кислот. Коэффициент ненасыщенности жирных кислот превышал в 2 раза величину, установленную для трески. При сравнительно невысоком содержании водорастворимых витаминов группы В (тиамина и рибофлавина), что вообще характерно для гидробионтов, уровень токоферолов в теле мидий оказался на порядок выше, чем в мясе других морских беспозвоночных, например креветок [2].

Поскольку технология культивирования мидий успешно освоена во многих странах мира, то их марикультура представляет собой хорошую возможность получения дешевого высококачественного белка и БАВ. Развитие марикультуры моллюсков будет идти, очевидно, в направлении поликультуры, обеспечивающей большую устойчивость урожаев и полное комплексное использование ресурсов водоема.

До недавнего времени Баренцево море оценивалось как бесперспективное для разведения морских беспозвоночных животных [19]. В течение многих лет традиционно считалось, что только южная зона может быть перспективна для организации мидиевых хозяйств. Однако к 1975 г. стал известен успешный опыт мидиевых ферм в прибрежных зонах Норвегии и Шотландии, где в условиях относительно низких температур воды за 14–18 месяцев в марикультуре были выращены товарные мидии с продуктивностью до 70 т мяса с 1 га [20]. Эксперименты ПИНРО, проводимые на первой опытной мидиевой ферме в 1975–1981 гг., также показали возможность выращивания на Мурмане мидии съедобной. В условиях полярной марикультуры мидия достигала товарного размера за трехлетний период [8]. Это более длительный срок по сравнению с ростом мидий на плантациях Черного моря (где за 1 год получают до 300 т мяса/га), но при правильной организации мидиевого хозяйства и бесперебойном подращивании молоди трехлетний цикл выращивания деликатесного мяса может быть вполне рентабельным [21]. Уже на основании первых практических данных, полученных на плантации ПИНРО, видно, что опытные фермы на Баренцевом море могут оказаться более продуктивными, чем это предполагалось ранее. Указывая на теоретическую возможность подращивания мидии в промышленных масштабах, допускалось, что годовой валовой сбор в сыром весе мягких тканей мидий может составить около 10–15 т/га поверхности искусственного субстрата [19].

Обобщенный опыт марикультуры мидий на Мурмане [8] убедительно свидетельствует о рентабельности мидиевых ферм даже в условиях Заполярья. Установлено, что в условиях плантации можно получать 10–12 кг мяса с 1 м<sup>2</sup> площади за 10 месяцев подращивания, что при пересчете составит 120 т с 1 га плантации в год [2].

Этот опыт можно успешно применить при утилизации молоди мидий на Баренцевом и Белом морях, так как первоначальная рентабельность выращивания более крупных мидий для их кулинарного использования (главным образом как деликатеса) будет, очевидно, невысока. С учетом продолжительности зимовки, а также ее трудностей при культивировании мидий, представляется перспективным на первом этапе развития марикультуры на Севере использовать одно- и двухгодовиков мидий для кормовых целей и технической (и фармацевтической) переработки.

В настоящее время специалистами ПИНРО разработан способ выращивания мидий в прибрежной зоне северных морей в биккультуре с лососевыми видами рыб [22].

Коллекторы выполняют в виде полос из долевого полотна длиной 3 м и шириной 30 см, нижнюю сторону деля снабжают грузом, вес которого достаточен для заглужения коллектора. В качестве носителей коллекторов используют конструкции плавучей платформы садкового

хозяйства, с внешней и внутренней сторон которой в период с июня по сентябрь коллекторы для сбора спата мидий закрепляют стационарно на расстоянии около 1 м друг от друга и погружают на глубину 0.5–1.0 м от водной поверхности. Такая глубина погружения коллекторов будет оптимальна в любой период культивирования моллюсков [22].

Осевшие на коллекторы мидии культивируют без изменения положения коллекторов в двух- или трехлетнем цикле в зависимости от поставленных задач по переработке продукции и по окончании установленного цикла собирают урожай мидий преимущественно в конце мая — июне до начала нереста моллюсков, когда в них содержится наибольшее количество качественного мяса [22].

В качестве груза для заглубления можно использовать достаточно тяжелые предметы, например камни и иные подручные материалы, которые закрепляют на нижнем конце полосы делового полотна.

При этом органические вещества — отходы жизнедеятельности рыб — дополнительно создают среду для развития микрофлоры и фитопланктона, повышая "кормность" среды для мидий — этих активных фильтратов, что в конечном счете способствует повышению продуктивности мидий не только по сравнению с мидиями с природных банок, но и с мидиями, культивируемыми в монокультуре [22].

Осевшие на коллекторы мидии не подвергаются воздействию отливов, периодически осушающих литоральные поселения мидий и влекущие за собой соответствующую прерывистость в поступлении пищи. Мидии на субстратах постоянно находятся в согретом, хорошо аэрируемом слое воды, толщина которого учтена при определении размеров субстратов-коллекторов для культивирования моллюсков [22].

В возрасте два года урожай мидий составляет 15 кг, три года — 16–20 кг с одного коллектора размером 3.0×0.3 м.

При выращивании мидий на пищевые цели длительность культивирования не превышает трех лет: в этом возрасте на коллекторах преобладает мидия размером более 50 мм.

Если урожай мидий направлять на медицинские цели, то мидию можно культивировать два года, в этом возрасте общая биомасса мидий на коллекторе почти одинакова с мидиями трехлетнего возраста, но количество товарной мидии не превышает 10–15 % [22].

Исландский гребешок *Chlamys islandica* O. F. Müller, 1776 (рис. 3) — двустворчатый моллюск, относящийся к отряду Pectinoida, семейству Pectinidae.

Гребешок широко распространен в Арктике и бореальных водах Северной Атлантики. У берегов России встречается в Баренцевом и Белом морях на глубинах от 5 до 100 м на ракушечных и песчаных грунтах, илистых грунтов избегает. Локальные плотные скопления может образовывать практически на всех глубинах, где обитает. Общая площадь обитания гребешка в Баренцевом море превышает 40 тыс. км<sup>2</sup>.

У Мурманского побережья гребешок обитает обычно в диапазоне глубин 5–150 м, преимущественно на песчаном грунте с примесью ракуши, галечно-гравийного и крупнообломочного материала, хотя может встречаться начиная с глубин 1–2 м, а также на каменистых и скальных грунтах [13]. Выделено несколько обособленных поселений, приуроченных к участкам с неровным дном. Наиболее обширные и плотные поселения расположены на глубинах менее 100 м в Семиостровской провинции, у о-ва Нокуев, в губе Савиха, северо-восточнее и восточнее (в Воронке Белого моря) м. Святой Нос и на Южно-Канинском мелководье (Канинской банке).

В местах обитания динамика придонных вод активная, соленость варьирует от 33.2 до 34.8 ‰, температура — от 0 до 7.2 °С [23]. Как и у других массовых видов рода *Chlamys*, скопления исландского гребешка приурочены к склонам банок и желобов, в районах гидрологических фронтов [23].

Такое распределение может быть связано как с улучшенным снабжением пищей (фитопланктоном, детритом), так и с концентрированием личинок в локальных круговоротах



[23]. Оптимальная скорость течения 20–25 см/с: при таких значениях на крупнопесчаных осадках численность и биомасса достигают максимальных значений 50 экз/м<sup>2</sup> и 4 кг/м<sup>2</sup> соответственно. При скорости течения ниже 5 и выше 40 см/с гребешки обнаружены не были [23].

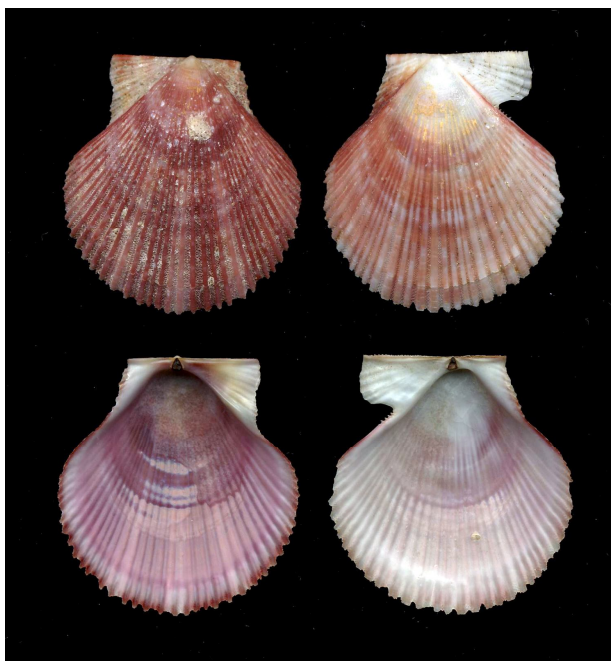


Рис. 3. Исландский гребешок *Chlamys islandica*

Мягкое тело гребешка заключено в округлую, слабо разностворчатую, равностороннюю раковину с небольшими выростами у макушки — ушками. Наружная скульптура створок представлена радиальными ребрами, дистальная часть которых покрыта двухнедельными чешуйками роста, образующими достаточно выраженные концентрические кольца. Замковый край раковины — прямой без зубов. Лигамент состоит из двух частей: внутренней и наружной. Внутренняя часть очень хорошо развита и располагается в треугольных ямках под макушками, наружная имеет вид тонкой пластиночки, соединяющей верхние прямые края створок. Окраска раковин очень разнообразна и варьирует от коричнево-фиолетовой, ярко-красной или оранжевой до белой. Верхняя створка, как правило, покрыта темноокрашенными концентрическими кольцами и немного более выпукла, чем нижняя. Нижняя створка окрашена бледнее и имеет у основания переднего ушка биссусный вырез, по краям которого располагается несколько зубчиков.

Изнутри раковина выстлана мантией, охватывающей с боков туловище моллюска. Мантийные лопасти, снабженные по краям щупальцами и глазами, не срстаются на брюшной стороне и образуют так называемый парус, закрывающий мантийную полость при плавании, которое осуществляется по принципу реактивного движения, как правило, макушкой назад.

Прикрепление гребешков к субстрату происходит с помощью тонких клейких нитей, выделяемых биссусной железой, расположенной в ноге.

Нога развита слабо, мышц-элеваторов нет, есть только один ретрактор, асимметрично прикрепляющийся к левой створке. Единственный мускул-замыкатель (аддуктор) разделен на два неравных отдела: большой — передний, состоящий из поперечнополосатых мышечных волокон, и задний, слагающийся из гладких волокон. Кроме вышеперечисленных, у гребешков имеются еще небольшие мышцы, которые поддерживают околосердечную сумку, фиксируют жабры и выполняют другие функции.

Щелевидное ротовое отверстие расположено на передней стороне тела. Пищей моллюскам служит фито-, зоо-, бактериопланктон и взвешенный детрит, приносимые с водой в мантийную полость.

На Мурманском побережье половое созревание гребешка начинается в 3 года и заканчивается к 6 годам: в этом возрасте все особи являются половозрелыми. У западной Гренландии этот процесс происходит с 4 до 9 лет при высоте раковины 30–55 мм. В Норвегии — с 5 до 7 лет при 40–50 мм. В раннем возрасте моллюски созревают преимущественно как самцы, но к 5 годам соотношение между полами выравнивается и становится близким к 1. Форма раковины самок и самцов не отличается. Самки отличаются от самцов цветом гонады: у самок она оранжевого цвета, у самцов — белого. Существует предположение, что вследствие относительно более высоких энергетических затрат на размножение выживаемость самцов ниже, чем самок, и у старших возрастов это может приводить к снижению их доли в соотношении полов [24]. Нерест происходит с апреля по сентябрь, и его конкретные сроки определяются, по одним данным [23], накопленной за год температурой в 380 градусодней, по другим [25] — началом развития фитопланктона.

В Баренцевом море, на западе у о-ва Медвежий, нерест происходит в апреле — мае и по мере продвижения на восток смещается на более поздние сроки: у западного побережья п-ова Канин он происходит в июне — июле. Плодовитость связана с высотой раковины аллометрической зависимостью (показатель степени  $b = 5.2$ ) и в среднем равна 5.2 млн яиц [23]. Оплодотворение наружное. Пелагический период личинки длится 9–10 недель [26].

Оседание происходит преимущественно на твердые субстраты, куда личинки прикрепляются биссусом. Один из наиболее предпочтительных субстратов — мертвый перисарк гидроидов рода *Tubularia*: личинки гребешка предпочитают перисарк живым гидроидам, красным водорослям и различным искусственным субстратам. Более того, "чистый" перисарк более предпочтителен, чем перисарк, покрытый бактериальной пленкой. Вероятно, основную роль в привлечении молоди играет белковый и/или полисахаридный компонент мертвого гидроида. Так же как и у мидии, осевшая молодь гребешка способна открепляться, некоторое время пребывать в толще воды, а затем заново прикрепляться. При этом отмечено, что повторное прикрепление обычно осуществляется к тому же субстрату, на который первоначально осела личинка. На коллекторы оседают преимущественно личинки, хотя через 3–4 месяца вторично осевшая молодь и обнаруживается в небольшом количестве [13].

Ярко выраженная сезонность роста, свойственная видам, населяющим высокие широты, позволяет сравнительно легко определять возраст по наружным кольцам и/или по меткам на обызвествленном основании лигамента. Применение обоих методов в комбинации с прямыми наблюдениями за осевшей молодь позволили оценить темпы роста и возрастной состав поселений в разных частях ареала.

На коллекторах за 1 год молодь дорастает до 7 мм в Норвегии и до 9.5 мм в Исландии. За 2–3 года в Исландии гребешки в подвесных садках дорастают до 25 и 40 мм соответственно. В естественных поселениях у западной Гренландии средний возраст моллюсков составляет 21 год при высоте раковины 87 мм. В Исландии максимальный возраст также составляет 20 лет, а максимальный размер достигает 140 мм. На Мурманском побережье в Семиостровском поселении максимальный возраст — 18 лет, до 90 мм гребешки дорастают в среднем за 8 лет [13].

Наиболее высокая скорость роста отмечена в районах, где соотношение между взвешенным неорганическим материалом и органикой минимально. Так же как и мидии, в толще воды (подвесная культура) гребешки растут лучше, чем на дне, и это объясняется более высокой долей фитопланктона в рационе и, соответственно, более низкой долей детрита. Так, в период весеннего цветения зарегистрированы и максимальные темпы роста. Возможно, на скорость роста влияет и внутривидовая конкуренция, так как даже в подвесной культуре лучше росли особи в садках, расположенных не над гребешковой банкой, а в стороне от нее.

Смертность наиболее высока на фазе личиночного развития (выживает одна личинка из 2.5 млн). В первый год жизни коэффициент естественной убыли равен  $1.13 \text{ год}^{-1}$ . Начиная с третьего года и до девяти лет смертность фактически постоянна и составляет  $0.12 \text{ год}^{-1}$ , и только у моллюсков старше девяти лет она увеличивается до  $0.2 \text{ год}^{-1}$ . Вследствие сильного

пресса хищников (морских звезд, крабов, донных рыб) молодь обитает преимущественно в убежищах: под ракушками, между валунами, в щелях [13]. Основные промысловые скопления гребешка расположены у мыса Святой Нос (южнее 69°с. ш.) преимущественно на глубине 70–100 м и в Воронке Белого моря преимущественно на глубине 40–60 м. В период 2000–2009 гг. наблюдалась тенденция уменьшения промыслового запаса гребешка в большинстве скоплений Баренцева моря (рис. 4).

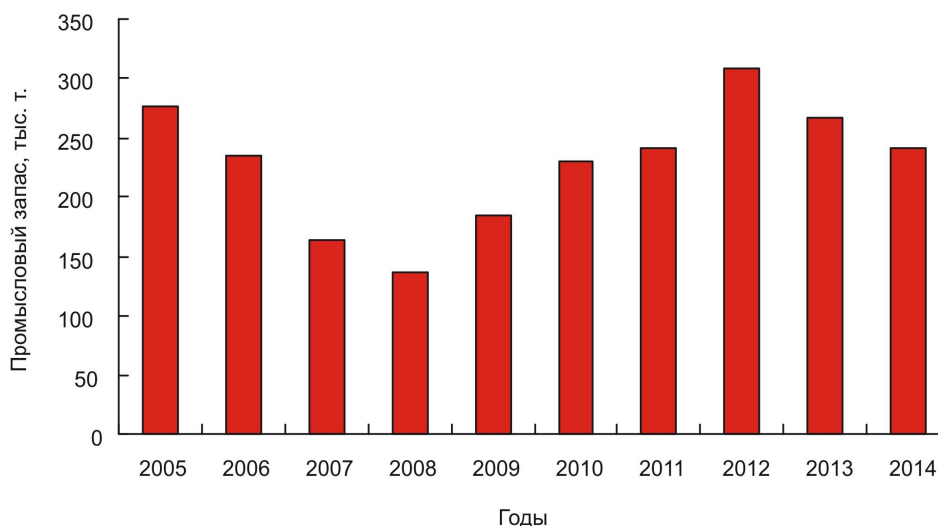


Рис. 4. Динамика промыслового запаса исландского гребешка в Баренцевом море в 2005–2014 гг. [27]

Наибольшее снижение запаса отмечалось на участке Святоносского поселения, располагающегося в исключительной экономической зоне РФ [27]. Вероятными причинами этого являлись негативное влияние промысла гребешка и донных видов рыб, отсутствие достаточного пополнения промыслового запаса, а также повышенная естественная смертность от болезней. В 2010–2014 гг. промысловые скопления гребешка сохранились только в зоне территориальных вод РФ и то лишь на той части акватории, где наблюдалось достаточное пополнение промыслового запаса [27].

В период промысла гребешка в Баренцевом море максимальные уловы наблюдались в 1997–1999 гг. — до 14 тыс. т в год, но в последние 10 лет улов значительно снизился и не превышал 3.1 тыс. т. (рис. 5).

Основным фактором, определяющим уменьшение вылова, было сокращение площади промысловых участков с высокими плотностями гребешка, что привело к снижению промысловых усилий и количества судов на промысле (с 5 до 1 ед.). В соответствии с рекомендациями ПИНРО, в 2009–2010 гг. промысел не проводился. С 2011 г. добыча возобновилась, но вылов, как правило, не превышал 0.5 тыс. т. (рис. 5). В 2014 г. (по данным на 1 декабря) было выловлено 817.8 т, средняя производительность промысла достигала 19.5 т за судо-сутки [27].

Культивирование гребешков имеет достаточно давнюю традицию, особенно в Японии, где успешно выращивают приморского гребешка *Mizuhopecten yessoensis* (Jay). В качестве основного способа выращивания этого вида в российских водах специалистами ТИНРО выбран экстенсивный метод, который заключался в сборе молоди на коллекторы и подращивании в садках. В ряде обобщающих работ [28, 29] проведен детальный анализ состояния марикультуры приморского гребешка на Дальнем Востоке. Процесс культивирования гребешков в этом районе был разделен на два этапа. На первом этапе проводят сбор оседающей молоди моллюсков и размещение ее на коллекторах, изготовленных из искусственных и естественных

субстратов. Время сбора спата и сроки его подращивания в садках выбирают с учетом процессов природного гаметогенеза, что необходимо для прогнозирования объемов оседания личинок. Чаще всего собранный спат размещают на грунте или в садках близ водорослевых плантаций, где в течение года осуществляется промежуточное выращивание молоди.

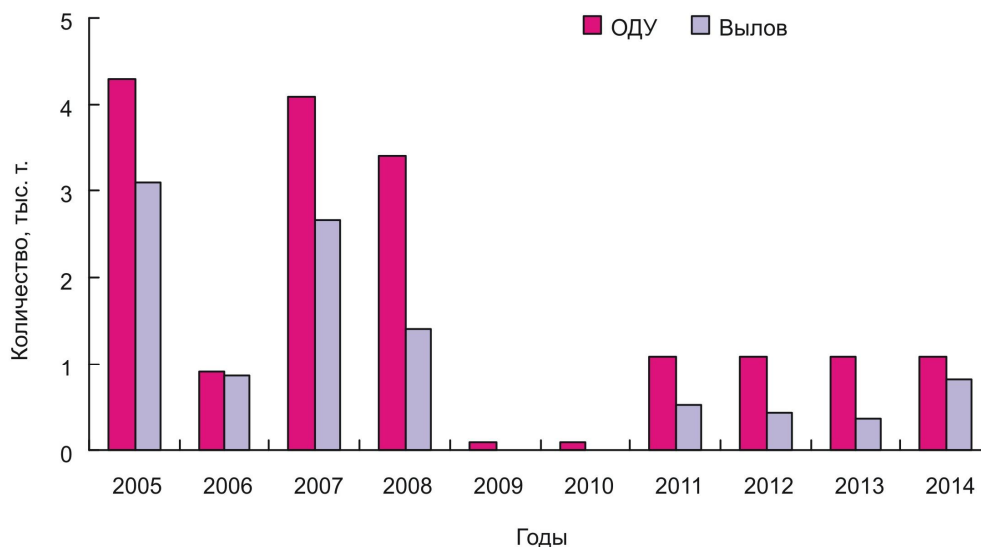


Рис. 5. Общий допустимый улов (ОДУ) и вылов исландского гребешка в Баренцевом море в 2005–2014 гг. [27]

Время выставления коллекторов в море определяют исходя из информации о плотности и качественном составе личинок гребешка в планктонных пробах.

После достижения молодью гребешка размеров 8–10 мм (обычно в августе) гирлянды коллекторов снимают с установок и разбирают на специальной понтон-площадке. Для выращивания в подвесной культуре отсортированную молодь помещают в садки (площадь дна садка 0.12 м<sup>2</sup>) с плотностью 20 экз/садок, тогда как для последующего перевода в донную культуру — с плотностью 250 экз/садок. Заполненные садки собирали в гирлянды, состоящие из 10 однотипных элементов, и вновь размещали на горизонтальных канатах установок. Осенью установки с садками притапливали на 1.5–2 м от поверхности воды.

В мае следующего календарного года моллюсков, предназначенных для выращивания в подвесной культуре, пересаживали в новые садки, снижая плотность до 10 экз/садок. При такой плотности их содержали на установках до конца технологического цикла.

В это же время молодь гребешка, содержащуюся с плотностью 250 экз/садок, освобождали из садков и помещали в транспортные емкости, в которых моллюсков доставляли морем к местам отсадки на грунт. Рекомендованная начальная плотность при выращивании гребешка в донной культуре составляла 10–15 экз/м<sup>2</sup>.

Продолжительность технологического цикла при выращивании гребешка в подвесной культуре была три, а для донной культуры — четыре года. Расчетная урожайность в эквиваленте прижизненной массы достигала 26 и 8 т/га соответственно.

За последние 30 лет предложенные технологические схемы не претерпели существенных изменений, а объемы выращивания гребешка в Приморье так и не достигли промышленных.

Эксперименты и полевые наблюдения показали, что выращивание гребешка в бикультуре с ламинарией позволяет увеличить скорость его роста и индекс кондиции. Во время второго этапа уже подросших моллюсков переводят в специальные садки, где они достигают товарных размеров. Иногда дорашивание гребешков проводят на грунте, но в таких условиях моллюски растут медленнее. В ходе экспериментов по подращиванию гребешков выяснилось, что личиночное пополнение имеет нерегулярный характер и его интенсивность может

варьировать в широких пределах [30]. Причиной этого может быть разрушение поселений гребешка, перемещающихся вместе с песком под воздействием штормового волнения в незащищенных рельефом участках дна. Кроме того, после двух лет подращивания в садках отмечается резкое уменьшение численности расселенной на грунте молоди гребешка за счет естественной убыли животных. Все это очень усложняет расчет усилий, необходимых для организации производства. Расчеты показали, что донное выращивание гребешков менее рентабельно, чем содержание особей в садках до товарного размера, т. е. 5–7 см.

Спорадичность и непредсказуемость объемов пополнения популяции молодь потребовало научных разработок по получению личинок и подращиванию молоди гребешка в контролируемых заводских условиях. Изучены способы регуляции гаметогенеза, стимуляции нереста гребешков [31], пищевые потребности и энергозатраты [32]. Разработаны также необходимые смеси и рационы питания для личинок гребешка и спата [33]. С целью интенсификации оседания личинок в специальных резервуарах были опробованы аттрактанты, оказавшиеся очень эффективными.

В условиях изменившихся в последнее десятилетие социально-экономических обстоятельств, особую актуальность приобретает не принципиальная возможность демонстрации того или иного способа выращивания гребешка, а экономическая целесообразность реализации таких технологических схем культивирования этих моллюсков, которые обеспечивают промышленные масштабы и приемлемую рентабельность хозяйств мариккультуры [28].

Для выявления возможности и целесообразности культивирования исландского гребешка учеными ММБИ осуществлена серия экспериментов по подращиванию 3–4-летней молоди моллюсков этого вида в губе Дальнезеленецкая Восточного Мурмана [23, 34]. Первоначально проводились наблюдения за выживаемостью гребешков, свободно подвешенных на вертикальных гирляндах в толще воды. Каждая гирлянда представляла собой капроновый шнур длиной 10 м, от которого через равные промежутки отходили 15 поводков из прочной леси. Свободный конец поводков продевался сквозь отверстие, высверленное в переднем ушке раковины моллюска, и завязывался узлом, не препятствующим раскрытию створок. Семь таких гирлянд с подвешенными к ним гребешками были закреплены на одном плавучем основании и размещены в защищенном от шторма месте глубиной 15 м (рис. 6, А) вблизи о-ва Немецкий (губа Дальнезеленецкая).

Месячная экспозиция моллюсков на установке в ноябре 1978 г. показала, что они хорошо перенесли операцию по высверливанию отверстия в ушке и внешне ничем не отличались от интактных особей с неповрежденной раковиной. Внутренняя поверхность створок, частично оголившаяся в момент перфорации вследствие сокращения паллиальной мускулатуры, к концу месяца полностью закрылась мантийной складкой. Гибели гребешков в течение всего периода наблюдений не отмечено.

В июле 1979 г. между островами Сухим и Жилым (в той же губе) на глубине 10 м была поставлена новая усовершенствованная установка, несущая 10 гирлянд и 20 конических садков (рис. 6, Б). В садках диаметром 40 см находилось 200 экз. моллюсков, на гирляндах длиной 8 м — 160 экз. Перед началом подращивания все гребешки были промерены, а помещенные в садки, в дополнение к этому, помечены стоматологическим инструментом. Наблюдения за подращиваемыми моллюсками в течение первых двух месяцев проводились ежедекадно, а в дальнейшем — ежемесячно. Регулярному осмотру на воздухе подвергались только особи опытной группы, составляющей ровно половину всей совокупности. Контрольная группа находилась в воде вплоть до окончания эксперимента в июне 1980 г. [34].

В первый месяц подращивания на гирляндах отмечена массовая гибель моллюсков, подвешенных в слое 0.5–1 м. Вероятно, это объясняется проникновением сквозь тонкий слой воды ультрафиолетового излучения, угнетающе действующего на многих гидробионтов. К концу третьей недели раковины гребешков покрылись густым войлоком нитчатых водорослей. На внутреннем участке створок, оголенном на ширину 5–8 мм в результате сокращения

травмированной мантии, появилась масса одноклеточных водорослей. В дальнейшем по этой причине у большинства особей наблюдался патологический рост раковины.

Активная кальцификация не затрагивала покрытую водорослями внутреннюю поверхность створок, и новые слои роста формировались в виде козырька над пораженной зоной. В целом годовой прирост на гирляндах в опытной и контрольной сериях статистически не различался, от глубины подращивания не зависел и составил в среднем  $5 \pm 4$  мм. Суммарная смертность моллюсков данной совокупности к концу срока наблюдений достигла 34 %, причем на долю опытной группы пришлось 38 %, а на долю контрольной — 30 %.

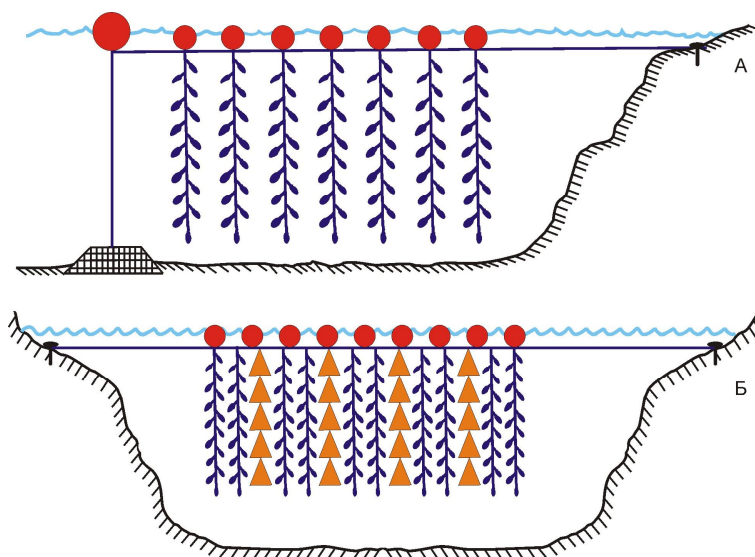


Рис. 6. Схема установок, применявшихся для подращивания гребешков в 1978 (А) и 1979 гг. (Б) [34]

В садках в первые дни эксперимента такая гибель гребешка, как на гирляндах, отмечена не была. Быстрое обрастание конуса конструкции нитчаткой послужило для находившихся внутри моллюсков надежной защитой от губительного воздействия ультрафиолетового излучения. Рост особей с нетравмированной мантией происходил в виде правильной кальцификации по краю раковины. Если на гирляндах момент начала роста установить было невозможно, то в садках увеличение размеров моллюсков за счет формирования новых слоев раковины стало заметным на четвертой неделе эксперимента. Годовой прирост в контрольной серии к концу периода наблюдений достиг  $15 \pm 3$  мм и статистически несколько отличался от прироста в опытной серии, составившего  $11 \pm 3$  мм. Суммарная элиминация за время подращивания оказалась вдвое ниже естественного уровня смертности и составила всего 6 %. Так же как и на гирляндах, в опытной группе она была выше (7 %), чем в контрольной [34].

Интересным результатом экспериментов явилось то, что у всех моллюсков на гирляндах и в садках новые, сформировавшиеся за время подращивания слои раковины приобрели красивую красно-пурпурную окраску. Произошедшие изменения изначальной расцветки створок (серо-белой, фиолетово-розовой и коричневой), вероятно, были связаны с повышенным содержанием каротиновых пигментов в sestone поверхностных слоев воды. В случае подтверждения полученных нами результатов представляется возможным практическое использование данного эффекта при культивировании гребешков не только для получения пищевой и кормовой продукции, но и с целью использования раковин моллюсков для производства декоративных изделий и сувениров. Подводя итог результатам эксперимента, необходимо отметить, что подращивание гребешков в садках выгодно отличается от подращивания на гирляндах за счет более высоких темпов роста и пониженной смертности [34].

На основе данных эксперимента и анализа эколого-физиологических характеристик популяций исландского гребешка оценена возможность промышленного культивирования гребешков в Баренцевом море [35]. Организация хозяйства по культивированию исландского гребешка на Баренцевом море рассмотрена в трех вариантах:

- 1) выращивание на коллекторе от личинки (спата) до года с последующим расселением в садки;
- 2) выращивание на коллекторе от личинки (спата) до года с последующим расселением на грунт;
- 3) сбор 2–3-летней молоди водолазами (промысловыми судами) с последующим подращиванием в садках до товарных размеров.

Варианты различаются периодами (сроками) выращивания гребешков до товарной продукции: 1-й — 5 лет, 2-й — 7 лет, 3-й — 3 года.

На первом этапе по первому и второму вариантам осуществляется сбор спата на коллекторы рамной установки с последующим выращиванием до года. При нормативном сборе спата на одном коллекторе 300 экз. и 20 % отхода для выращивания остается 250 экз. Общий объем товарного спата на одной установке — 5.3 млн экз. ( $250 \times 21210$ ), где 21210 — число коллекторов на одной установке. Через год спат по первому варианту пересаживается в садки по 250 экз. (первый вариант) или расселяется на грунте (второй вариант).

На следующем этапе первого варианта двухгодовиков пересаживают по 20 экз. в садок. При выживаемости 90 % моллюсков второго года выращивания для пересадки потребуется 11 установок. На последнем этапе плотность посадки трехгодовиков — 10 экз/садок. При выживаемости 95 % число установок увеличивается до 22.

К концу пятого года численность выращенных гребешков составит 4486 млн экз., товарная масса сырья — 408.1 т, масса мяса мускула — 44.8 т. Аналогичные результаты предполагаются для шестого года и по второму варианту [34].

Бесперывная замкнутая схема выращивания в первом варианте осуществляется при эксплуатации установок по сбору спата и подращиванию двухгодовиков, 11 установок для трехгодовиков и 44 — для завершающего двухлетнего периода. В целом предполагается использование 57 установок.

В третьем варианте планируется собранных водолазами 2–3-летних гребешков выращивать с плотностью посадки 20 экз/садок и пересадкой через год по схеме первого варианта. Для обеспечения равных объемов с первым вариантом необходимо 55 (11+44) установок.

В зависимости от глубины моря (10–35 м) время работы водолаза под водой колеблется от 1 до 2 ч. В среднем принимаем 1.5 ч. Одновременно работают два водолаза, в течение смены — три пары. При двухсменной работе общее время сбора гребешков двумя водолазами составит 9 ( $1.5 \times 3 \times 2$ ) ч/сут.

Расчеты показывают, что прибыльность обеспечивает второй вариант, наиболее убыточен третий, рентабельность которого не обеспечивается даже заменой водолазных работ сбором молоди из приловов в ходе промысла моллюсков судами. Проблематичным при реализации второго варианта является достаточная обеспеченность водолазными работами. Это же, помимо относительно высокой капиталоемкости, относится и к первому варианту [34].

На Северном бассейне при переработке используется лишь мускул гребешков. Это снижает возможности повышения цен на сырец. Однако в мировой практике находят применение и другие части тела моллюсков (гонады, мантия). Более высокая степень утилизации (при переработке) исландского гребешка позволит повысить в 1.5–2 раза цены на сырец. В этих условиях культивирование гребешков в Баренцевом море станет экономически приемлемым даже по первому варианту [34]. Более рациональной будет организация умеренного вылова гребешков в сочетании с недорогостоящими мероприятиями по пополнению их естественных ресурсов путем сбора на коллекторы оседающей молоди и расселения ее по подходящей акватории.

Основные проблемы в организации аквакультуры в Баренцевом море, как и в других водоемах РФ, связаны со следующими факторами [36]:

- на первоначальном этапе развития предприятий аквакультуры требуются крупные денежные средства и длительный цикл выращивания объектов;
- отсутствует информация о пригодности акватории для выращивания объектов марикультуры, что влечет за собой дополнительные расходы средств и времени на обследование участка и разработку биологического обоснования;
- подорваны естественные запасы гидробионтов, которые не позволяют новым предприятиям осуществлять сбор спата (молоди) в должном объеме;
- недостаточно эффективна финансовая поддержка, устарели производственные мощности и материально-техническая база, слабо развит механизм страхования рисков, отсутствует инновационная деятельность.

Подводя итог, отметим, что потенциальные возможности использования двустворчатых моллюсков в аквакультуре очень велики. Это обусловлено особенностями их биологии, среди которых можно выделить следующие важнейшие черты: фильтрационный тип питания, близость к начальным звеньям трофической цепи; относительно короткий жизненный цикл; относительно быстрый рост во всей толще воды, где расположены гидробиотехнические сооружения, до достижения товарных размеров; устойчивость взрослых моллюсков к колебаниям солености и температуры воды (для мидий), высокая плодовитость, высокая морфологическая вариабельность в естественных и искусственных местообитаниях. В настоящее время накоплен достаточный объем информации и созданы необходимые наработки для организации марикультуры мидий и исландского гребешка в Баренцевом море. Главным препятствием является относительно долгий период окупаемости финансовых вложений при организации акваферм на Кольском п-ове.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шилин М. Б., Саранчева О. Л. Полярная аквакультура. СПб.: РГМУ, 2005. 172 с.
2. Гудимов А. В. Мидия *Mytilus edulis* L. // Промысловые и перспективные для использования водоросли и беспозвоночные Баренцева и Белого морей. Апатиты: КНЦ РАН, 1998. С. 529–580.
3. Иванов А. В. Промысловые водные беспозвоночные. М.: Сов. наука, 1955. 353 с.
4. Кауфман З. С. Особенности половых циклов беломорских беспозвоночных как адаптация к существованию в условиях высоких широт. Морфоэкологические и эволюционные аспекты проблемы. Л.: Наука, 1977. 265 с.
5. Мамзеева Т. А. Биология *Mytilus edulis* L. Восточного Мурмана // Труды Мурманской биологической станции АН СССР. 1948. Т. 1. С. 215–241.
6. Field J. A. Biology and economic value of the sea mussel *Mytilus edulis* // Bulletin of U. S. Bureau of Fisheries. 1922. Vol. 38. P. 127–259.
7. Кузнецов В. В., Мамзеева Т. А. Материалы к биологической характеристике морских беспозвоночных Восточного Мурмана // Труды Мурманской биологической станции АН СССР. 1948. Т. 1. С. 242–260.
8. Федоров А. Ф. Продукционные возможности мидии (*Mytilus edulis* L.) в марикультуре. Мурманск; Апатиты: КФ АН СССР, 1987. 104 с.
9. Количественное распределение хозяйственно-ценных беспозвоночных у побережья Мурмана / Т. В. Антипова [и др.] // Бентос Баренцева моря. Распределение, экология и структура популяций. Апатиты: КФ АН СССР, 1984. С. 113–123.
10. Агарова И. Я. Результаты многолетних наблюдений за популяцией *Mytilus edulis* L. на одной из литоральных отмелей Восточного Мурмана // Промысловые двустворчатые моллюски-мидии и их роль в экосистемах. Л.: ЗИН АН, 1979. С. 8–10.
11. Гудимов А. В., Костылев В. Э. Темпы роста баренцевоморских мидий в садках и лабораторных условиях // Симпозиум по онтогенезу морских беспозвоночных. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1988. С. 22–23.
12. Костылев В. Э. Состояние мидиевых поселений в губе Зеленецкая Западная (1985) // Трофические взаимоотношения организмов бентоса и донных рыб Баренцева моря. Апатиты: КФ АН СССР, 1989. С. 92–95.
13. Ржаевский А. В., Буяновский А. И., Бритаев Т. А. Биология исландского гребешка *Chlamys islandica* (Bivalvia, Pectinidae) и пространственно-временная организация его поселений в губах Восточного Мурмана // Успехи современной биологии. 2010. Т. 130, № 1. С. 63–79.
14. Касьянов В. Л. Репродуктивная стратегия морских двустворчатых моллюсков и иглокожих. Л.: Наука, 1989. 179 с.
15. Crisp D. J. Chemical factors inducing settlement in *Crassostrea virginica* Gmelin // Journal of Animal Ecology. 1967. Vol. 36. P. 329–335.
16. Киселева Г. А. Факторы, стимулирующие метаморфоз личинок двустворчатого моллюска *Brachiodontes lineatus* (Gmelin) // Зоологический журнал. 1966. Т. 45, № 10. С. 1571–1573.
17. Сублиторальные поселения *Mytilus edulis* в Воронке Белого моря / С. Г. Денисенко [и др.] // Сырьевые ресурсы и основы рационального использования промысловых беспозвоночных: тез. докл. всесоюз. совещ. (Владивосток, 22–24 ноября 1988 г.). Владивосток: ТИНРО, 1988. С. 66–67.
18. Лагунов Л. Л. Пищевая ценность мидий и их использование // Промысловые двустворчатые моллюски-мидии и их роль в экосистемах. Л.: ЗИН АН СССР, 1979. С. 80–81.
19. Агарова И. Я. К вопросу о культивировании мидии *Mytilus edulis* L. в Баренцевом море // Промысловые двустворчатые моллюски-мидии и их роль в экосистемах. Л.: ЗИН АН СССР, 1979. С. 10–11.
20. Лавровская Н. Ф. Культивирование мидий за рубежом // Промысловые двустворчатые моллюски-мидии и их роль в экосистемах. Л.: ЗИН АН СССР, 1979. С. 78–80.
21. Кулаковский Э. Е., Кунин Б. Л. Особенности роста *Mytilus edulis* L. на искусственных субстратах плотов-коллекторов в Белом море // Промысловые двустворчатые



моллюски-мидии и их роль в экосистемах. Л.: ЗИН АН СССР, 1979. С. 75–76. **22.** Воробьева Н. К., Лазарева М. А. Способ культивирования двустворчатого моллюска-мидии в бикультуре с радужной форелью: пат. Рос. Федерация. № 2294634; 2004. **23.** Денисенко С. Г. Экология и ресурсы исландского гребешка в Баренцевом море. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1989. 138 с. **24.** Brokordt K. B., Guderley H. Energetic requirements during gonad maturation and spawning in scallops: sex differences in *Chlamys islandica* // Journal of Shellfish Research. 2004. Vol. 23. P. 25–32. **25.** Arsenault D. J., Giasson M. C., Himmelman J. H. Field examination of dispersion patterns of juvenile Iceland scallops (*Chlamys islandica*) in the northern Gulf of St. Lawrence // Journal of Marine Biological Association of the U. K. 2000. Vol. 80. P. 501–508. **26.** Gruffydd L. D. The development of the larvae of *Chlamys islandica* in the plankton and its salinity tolerance in the laboratory (Lamellibranchia, Pectinida) // Astarte. 1975. Vol. 8. P. 61–67. **27.** Золотарев П. Н. Исландский гребешок // Состояние сырьевых биологических ресурсов Баренцева моря и Северной Атлантики в 2015 г. Мурманск: ПИНРО, 2015. С. 33–34. **28.** Брыков В. А., Колотухина Н. К. Биологические основы культивирования приморского гребешка в прибрежных водах Приморского края // Вопросы рыболовства. 2009. Т. 11, № 3 (43). С. 564–586. **29.** Садыхова И. А. Биологические основы культивирования моллюсков в морях России // Биологические основы марикультуры. М.: Наука, 1998. С. 56–70. **30.** Габаев Д. Д., Львов С. М., Поликарпова Г. В. Способы культивирования приморского гребешка // Рыбное хозяйство. 1986. № 5. С. 23. **31.** Седова Л. Г., Викторовская Г. И. Зависимость интенсивности обмена от репродуктивной активности морского гребешка *Mizuhopecten yessoensis* (Jay) // Известия ТИНРО. 2000. Т. 127. С. 469–474. **32.** Макарова Л. Г., Брегман Ю. Э., Викторовская Г. И. Ранний онтогенез приморского гребешка: количественные закономерности метаболизма в лабораторной культуре // Биология и культивирование моллюсков. М.: Наука, 1987. С. 48–56. **33.** Методические рекомендации по биотехнологии получения личинок приморского гребешка в лабораторных условиях / Чан Г. М. [и др.]. Владивосток: ТИНРО, 1988. 37 с. **34.** Денисенко С. Г., Денисенко Н. В. Эксперимент по культивированию исландского гребешка *Chlamys islandica* (Muller) и возможности его промышленного воспроизводства // Современные технологии и прогноз в полярной океанологии и биологии. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. С. 157–165. **35.** Денисенко С. Г., Гудимова Е. Н., Куранов Ю. Ф. Двустворчатые моллюски // Биологические ресурсы побережья Кольского полуострова. Современное состояние и рациональное использование. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. С. 57–68. **36.** Коваль И. В., Овчинникова И. А. Состояние и тенденции развития аквакультуры в Приморском крае // Вестник ТГЭУ. 2013. № 1. С. 36–47.

#### Сведения об авторах

Дворецкий Александр Геннадьевич — кандидат биологических наук, заведующий лабораторией Мурманского морского биологического института КНЦ РАН

E-mail: dvoretskiya@mmbi.info

Дворецкий Владимир Геннадьевич — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Мурманского морского биологического института КНЦ РАН

E-mail: vdvoretskiy@mmbi.info

#### Author Affiliation

Alexander G. Dvoretsky — PhD (Biology), Head of Laboratory of the MMBI of the KSC of the RAS

E-mail: dvoretskiya@mmbi.info

Vladimir G. Dvoretsky — PhD (Biol.), Leading Researcher of the MMBI of the KSC of the RAS

E-mail: vdvoretskiy@mmbi.info

#### Библиографическое описание статьи

Дворецкий, А. Г. Проблемы и перспективы культивирования двустворчатых моллюсков в Баренцевом море / А. Г. Дворецкий, В. Г. Дворецкий // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 2 (25). — С. 57–72.

#### Reference

Dvoretsky Alexander G., Dvoretsky Vladimir G. Problems and Perspectives of the Bivalve Mollusks Aquaculture in the Barents Sea. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 3 (26), pp. 57–72. (In Russ.).

УДК 550.4 (471.21)

## ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТЕЙ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

**В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин**

ФГБУН Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

### Аннотация

Проведены исследования содержания тяжелых металлов (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg) в донных отложениях (ДО) озер центральной и юго-восточной частей Мурманской обл. Водосбор р. Нива характеризуется наиболее высоким уровнем антропогенной нагрузки, поэтому в его водоемах концентрации Ni, Cu, Co, As и Hg в поверхностных ДО намного выше, чем в водоемах водосбора р. Тулома. Ареалы высоких значений концентраций тесно коррелируемых Ni, Cu, Co, As и Hg в поверхностных ДО исследуемых озер совпадают и ограничиваются 40–50-километровой локальной зоной вокруг металлургических предприятий. Pb и Cd, являясь глобальными загрязняющими металлами, не показали зависимости концентраций в поверхностных слоях ДО от расстояния до основного источника загрязнения — комбината «Североникель».

### Ключевые слова:

*донные отложения, озера, Мурманская область, тяжелые металлы, загрязнение.*

## HEAVY METALS IN LAKE SEDIMENTS OF THE CENTRAL AND SOUTHWEST PARTS OF THE MURMANSK REGION

**Vladimir A. Dauvalter, Nikolai A. Kashulin**

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

### Abstract

We have conducted the research of the content of heavy metals (Ni, Cu, Co, Zn, Cd, Pb, As, Hg) in sediments of lakes of the central and southeast parts of the Murmansk region. The reservoir of the Niva River is characterized by the highest level of anthropogenous loading, therefore concentrations of Ni, Cu, Co, As and Hg in superficial sediments in its reservoirs are much higher, than in reservoirs of watershed of the Tuloma River. The areas of high values of concentration of the closely correlated Ni, Cu, Co, As and Hg in superficial sediments of the studied lakes coincide and are limited to a 40-50-km local zone around metallurgical enterprises. Pb and Cd, being the global polluting metals, have not showed dependence of concentration in superficial sediments on distance to the main source of pollution – the “Severonikel” Metallurgical Company.

### Keywords:

*sediments, lakes, Murmansk region, heavy metals, pollution.*



### Введение

Климатические, геологические, ландшафтные особенности территорий водосборов, близость Белого моря и другие природные (а в последнее время и антропогенные) условия имеют большое значение при формировании качества поверхностных вод, химического состава воды и донных отложений (ДО) озер центра и юго-запада Мурманской обл., где встречаются, в основном, ультрапресные и олиготрофные водоемы с различной прозрачностью вод. Большое влияние на качество вод оказывает залесенность (в среднем 62.2 %) водосборных бассейнов.

Водные системы центрального и юго-западного районов Мурманской обл. в целом бывают двух различных типов: крупные озерно-речные системы основных рек и системы многочисленных малых озер и рек (рис. 1). По происхождению озера делятся на две основные группы: ледниковые и тектонические. Большинство озер относится к ледниковым, которые имеют округлую или овальную форму и небольшую глубину. Иногда встречаются запрудные озера в составе рек, которые образовались в результате преграждения мореной какого-либо поверхностного стока воды. Ложа этих озер имеют удлиненные формы и большие глубины. Озера тектонического происхождения расположены в глубоких котловинах, имеют вытянутые формы, сложные конфигурации береговой линии и неровные рельефы дна.

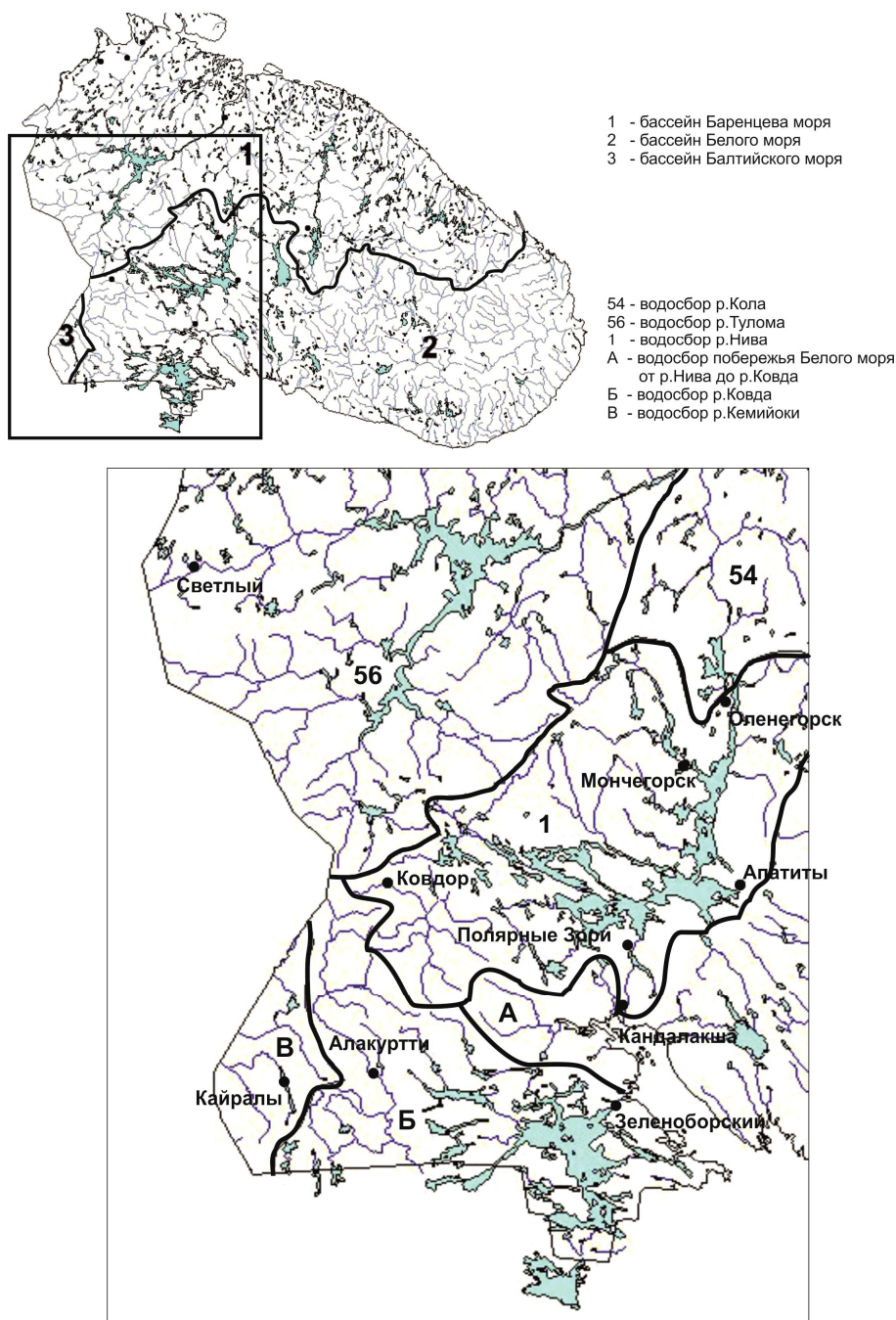


Рис. 1. Карта-схема размещения водосборов озер центральной и юго-западной частей Мурманской обл.

Главные компоненты водного баланса озер — приток поверхностных вод с водосборной площади, осадки в виде дождя и снега, поверхностный и подземный сток; испарение. Для водоемов центральной и юго-западной частей характерно преобладание поверхностного притока и стока в водном балансе, осадки близки к потерям на испарение и могут составлять от 2 до 16 % баланса [1]. Водоемы области, изначально обладая высокими природными качествами, представляют собой важнейшие природные ресурсы Субарктики. Но за последнее столетие качество этих водоемов серьезно ухудшилось вследствие глобальных изменений, происходящих на нашей планете. Многочисленные разномасштабные региональные источники также вносят значительный вклад в процессы трансформации поверхностных вод Мурманской обл.

В последнее время всё большую актуальность для арктических и субарктических регионов приобретает проблема оценки последствий долговременного загрязнения водоемов, расположенных в отдаленных фоновых районах. Территория юго-западной части Мурманской обл. в целом не подвержена серьезному прямому антропогенному воздействию, связанному с деятельностью металлургических и горнодобывающих комплексов. Наибольшую антропогенную нагрузку испытывают водные системы, расположенные в центральном промышленном районе и принимающие сточные воды крупных городов и промышленных предприятий, таких как комбинат «Североникель» (р. Ньюдай — оз. Имандра), «Олкон» (р. Кола, оз. Имандра) и ОАО «Апатит» (р. Белая — оз. Имандра, Умбозеро), ОАО «Ковдорский ГОК» (р. Ковдора). Выбрасываемые в атмосферу вещества способны переноситься воздушными потоками на большие расстояния, и их выпадение приводит к медленному накоплению на территории водосборов и непосредственно в водоемах.

### **Особенности формирования химического состава донных отложений озер центральной и юго-западной частей Мурманской области**

Важной особенностью водоемов рассматриваемой территории Мурманской обл. является, с одной стороны, их высокая рыбохозяйственная ценность, относительное многообразие видов и условий для воспроизводства и развития рыб. С другой стороны, практически все рассматриваемые озерно-речные системы зарегулированы за счет множества водоподпорных сооружений гидроэнергетического комплекса. Кроме того, экосистемы указанного района долгое время были подвержены интенсивному влиянию промышленного загрязнения. Флуктуации гидрологического режима и усиление процессов антропогенного эвтрофирования водоемов послужили причиной нарушения процессов естественного воспроизводства ценнейших лососевых (атлантический лосось, кумжа, арктический голец), сиговых, а также хищных весенне-нерестующих видов.

Центральная и юго-западная часть Мурманской обл. характеризуется сложным геологическим строением. На отдельных участках сохранилась древняя кора выветривания (Хибинские тундры, Ковдорский район). В центральной части коренные породы покрыты четвертичными отложениями (морена и песчаные флювиогляциальные отложения) и продуктами болотных образований. Обнажения коренных пород встречаются редко, что создает иные условия формирования качества вод. Горные массивы приурочены к относительно молодым интрузиям (Хибинские тундры, Чуна-тундра, Монче-тундра, Волчьи тундры, Сальные тундры).

Тектоника центральной и юго-западной частей проявилась в виде различных по глубине и длине линейных трещин и сбросовых впадин, которые имеют меридиональное и широтное направление. Трещины в настоящее время заняты реками, впадины — озерами. Нередко впадины приобретают лопастную форму. Цепочки холмов и гряды (высотой от 10–50 до 180 м) вытянуты преимущественно с северо-востока на юго-запад или с северо-запада на юго-восток и разделены плоскими заболоченными понижениями. Гребни гряд и вершины холмов плоские или округлые, склоны крутизной до 15°, местами обрывистые, на отдельных участках со скоплениями валунов диаметром до 2 м. В рельефе местами выделяются озы — длинные (до 10 км), плосковерхие валы шириной по верху от 5 до 25 м, высотой до 30 м и склонами крутизной 20–35°.

В центре Мурманской обл. расположена крупная возвышенность — Хибинские тундры. Высота отдельных гор достигает 1–1.2 тыс. м над уровнем моря. Горные массивы имеют

платообразный характер вершин и крутые вогнутые склоны (50–60 °). Продолжением горного массива является район возвышенностей Чуна-тундра и Сальные тундры с высотами до 1 тыс. м. На юго-западе выделяются Кюме-тундра и Вайна-тундра с высотами до 600 м.

Климат Мурманской обл. находится под смягчающим влиянием Баренцева и Белого морей, но Белое море зимой покрывается льдом. При удалении вглубь полуострова влияние морей довольно быстро исчезает, термический режим центрального и юго-западного районов становится несколько суровее и продолжительнее на 1 месяц [1]. Преобладающая дневная температура воздуха в наиболее холодные месяцы (январь и февраль) — -13 ... -18 °С, ночная — -16 ... -23 °С (абс. мин. — -41 °С). В горах климат отличается большей территориальной изменчивостью: падением температуры воздуха, силой ветра и продолжительностью залегания снежного покрова. Осадки довольно значительны (в среднем 577 мм/год), распределяются по площади сравнительно равномерно, но в горах быстро возрастают с высотой.

Характерные почвы Мурманской обл. — подзолистые почвы с различной степенью оподзоленности, которые развиваются в зоне тайги, в местах развития лесотундровых ассоциаций, часто встречаются в тундровой зоне. В условиях значительного увлажнения бедные растворимыми веществами подзолистые почвы очень мало минерализованы. Мелкоземистые тундровые почвы в некоторых случаях проникают в леса, например долинная тундра вблизи оз. Малый Вудъявр в Хибинах. Распространены также торфяно-болотные почвы, среди которых встречаются примитивные тундровые почвы, приуроченные к возвышенным и более расчлененным местам. Тундровые почвы свойственны зоне тундр, а также горным вершинам и склонам над границей лесной растительности. Небольшие площади в долине рек Тулома и Ена заняты дерновыми почвами естественного происхождения, связанными с особенностями речных отложений, богатых питательными веществами.

В прямой связи с почвами описываемых районов находится развитие растительного покрова, который представлен различными комплексами лесотундровой и таежной растительности. Наиболее распространены комплексы лесов, лесотундры и болотной растительности. Таежная зона, включая лесотундру, занимает основную часть территории. Леса состоят в основном из ели, сосны и березы с преобладанием хвойных пород. На участках горелого и вырубленного леса распространена поросль березы и сосны. Тундры представлены чаще всего горными тундрами, для которых характерны каменные россыпи и выходы скал. Площади тундр заняты преимущественно кустарничковыми тундрами, мхами и лишайниками. Среди растительности болот наибольшее распространение имеют грядово-мочажинные, кустарничко-сфагновые и осоковые комплексы. Большое распространение имеют болота, заросшие сосной и березой.

Наряду с другими природными факторами (климатическими, географическими, ландшафтными и геологическими условиями), гидрохимические параметры определяют формирование химического состава ДО. Загрязнение водных объектов, вызывая физико-химические изменения состояния воды, приводит к нарушению экологического баланса системы. Изучение уровней содержания загрязняющих веществ и закономерностей перераспределения элементов при движении потока загрязненных вод — необходимое условие для обоснованного прогнозирования качества природных вод.

Для природных вод озер, расположенных в центре и на юго-западе Мурманской обл., типичен следующий порядок распределения главных ионов:  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ ;  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$ . В 90 % исследованных озер состав вод соответствует природному распределению и относится к классу гидрокарбонатных вод. Кальций и натрий характеризуются высоким содержанием в земной коре (2.96 и 2.50 % соответственно [2]), где находятся, главным образом, в виде силикатов и алюмосиликатов. Сопоставление содержания катионов показывает, что в водоемах исследуемых районов  $\text{Na}^{2+}$  и  $\text{Ca}^+$  распределены равномерно (в среднем 4.13 и 3.61 мг/л соответственно). На их долю в катионном составе приходится от 2 до 87 %. Меньшая вариабельность наблюдается по  $\text{Mg}^{2+}$  (0.01–11.0 мг/л) и  $\text{K}^+$  (0.07–17.0 мг/л). В распределении главных ионов в озерах по мере удаления от центрального промышленного района увеличения

или уменьшения их содержания не наблюдается. Исследуемые водоемы характеризуются нейтральными величинами pH. Среди обследованных водоемов в центре и на юго-западе Мурманской обл. озера с  $\text{pH} < 6$  составили всего 6%. Озера с низкими значениями pH, как правило, невелики по размерам — их площадь составляет в среднем менее 0.1 км<sup>2</sup>, и в них наблюдается увеличение содержания органического вещества.

На исследуемой территории для водоемов преобладающими загрязняющими веществами с токсичным эффектом являются тяжелые металлы (ТМ), в первую очередь выпускаемые на промышленных предприятиях региона Ni, Cu, Co и др. В целом территория юго-западной части Мурманской обл. не подвержена серьезному антропогенному воздействию, связанному с деятельностью металлургических и горнодобывающих комплексов. Центральные районы, наоборот, расположены в непосредственной близости от промышленных предприятий на водосборах рек Ньюдай, Белая и Ковдора. В эти реки сбрасываются недостаточно очищенные сточные воды после очистных сооружений и дренажные воды рудников. В настоящее время в большинстве озер на территории центрального района Мурманской обл. вследствие значительного антропогенного воздействия наблюдается значительное превышение в содержании многих загрязняющих веществ. Химический состав вод малых озер исследованной территории явно отражает антропогенную специфику условий его формирования.

### Материалы и методы

При написании этой статьи использовались результаты научно-исследовательских работ Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН, начатых в 1989 г. и продолжающихся до настоящего времени, включая инженерно-экологические изыскания в зоне влияния выбросов и стоков промышленных предприятий [3–7], а также монографии [8–16]. Настоящая статья продолжает предыдущие публикации [17–19], касающиеся оценки экологического состояния озер Мурманской обл. по результатам исследования химического состава ДО.

Этот состав исследовался в 59 озерах центральной и юго-западной частей Мурманской обл., из которых 42 озера находятся на водосборе р. Нива, 12 — на водосборе р. Тулома, 3 — на водосборе р. Ковда и по одному озеру на водосборе р. Кола и на побережье Белого моря. Указанная часть Мурманской обл., особенно водосбор р. Нива, индустриально интенсивно развита. Здесь располагаются главные источники загрязнения Мурманской обл., которые оказывают большое влияние на формирование химического состава современных ДО. Вместе с тем, на химический состав ДО влияют природные условия, такие как геохимический состав подстилающих горных пород и почв, климатические характеристики (температура, осадки, испарение), жизнедеятельность гидробионтов, химический состав воды, в том числе и растворенные там газы, геохимическая обстановка в водной толще и ДО и т. д. По этим показателям и параметрам, как и по источникам загрязнения, водосборы озер очень разнообразны, что выражается также в разнообразии химического состава ДО и в поверхностных слоях, отражающих современное состояние водосборов озер, и в толщах ДО, где находят отражение природные условия формирования химического состава.

Для оценки экологического состояния озер производился отбор колонок ДО и определение содержания элементов, в том числе ТМ, в центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН. Методика отбора проб ДО и их химического анализа подробно описана ранее [12, 20].

### Результаты и их обсуждение

Для оценки качества ДО озер центральной и юго-западной частей Мурманской обл., аккумуляции и распределения в них химических элементов, как и в предыдущих статьях [17–19], рассматривались четыре аспекта: 1) фоновые концентрации элементов; 2) их вертикальное распределение в толще ДО; 3) концентрации элементов в поверхностных ДО; 4) значения коэффициента и степени загрязнения, которое создают ТМ, накопленные в ДО.

*Фоновые концентрации тяжелых металлов*

При оценке интенсивности загрязнения очень важно иметь достоверные значения фоновых концентраций, которые сравниваются с содержаниями элементов в верхних слоях ДО, отражающими современное состояние окружающей среды. Фоновые содержания элементов определялись в образцах, отобранных из самых глубоких слоев колонок ДО (обычно более 20 см) и отложившихся более 200 лет тому назад, они характеризуют период до любого заметного загрязнения [12, 21–23].

Фоновые концентрации элементов в ДО рассматривались отдельно в озерах водосборов рек Нива и Тулома вследствие различия в геохимических и климатических особенностях водосборной территории (табл. 1). Средние фоновые концентрации ряда ТМ (Cu, Ni, Zn, Co, Hg) в ДО озер водосборов рек Нива и Тулома подобны, фоновые концентрации Cd в 1.7 раз больше в озерах водосбора р. Туломы, а фоновые концентрации Pb и As больше в озерах водосбора р. Нивы в 3.1 и 2.6 раз соответственно. В целом средние фоновые концентрации ТМ в ДО озер центральной и юго-восточной частей Мурманской обл. подобны или ниже, чем в малых озерах Мурманской обл., определенных ранее [24].

Интенсивность осадконакопления и содержание элементов в ДО могут зависеть от морфометрических характеристик озер [25] и от ряда геологических, геохимических, физических, химических и биологических факторов. Для определения факторов, имеющих наибольшее влияние на формирование химического состава фоновых ДО исследуемых озер, проведен корреляционный и факторный анализ (табл. 2–5) для озер водосборов рек Нива и Тулома.

Таблица 1

Фоновые концентрации ТМ в ДО озер водосбора р. Нива (числитель)  
и озер водосбора р. Тулома (знаменатель)

Значение	ППП, %	Металлы, мкг/г сухого веса							
		Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
Среднее	23.90	23.1	24.3	72	10.8	0.18	5.2	2.50	0.028
	25.32	23.0	29.9	74	10.8	0.30	1.7	0.97	0.038

Окончание таблицы 1

Медианное	19.98	20.5	19.7	70	9.8	0.11	4.0	1.22	0.024
	24.88	18.0	19.5	56	4.2	0.29	1.5	0.88	0.030
Минимальное	2.19	5.8	4.9	16	1.3	0.01	0.4	0.10	0.006
	14.60	3.4	6.0	24	2.0	0.03	0.9	0.50	0.022
Максимальное	88.85	67.9	71.7	200	27.5	0.76	27.2	9.62	0.069
	38.19	53.9	73.9	207	53.0	0.78	2.5	1.62	0.071
Стандартное отклонение	17.62	14.2	15.9	42	7.2	0.20	4.6	2.79	0.018
	7.07	15.4	21.4	56	14.3	0.21	0.4	0.47	0.023
Средние по Мурманской обл. [24]	—	27	27	96	13	0.23	4.4	3.2	0.035

Корреляционный анализ (табл. 2 и 3) выявил две группы ТМ, имеющих достаточно высокую корреляционную связь между собой: 1) металлы, имеющие широкое распространение в минералах и горных породах Мурманской обл., особенно в центральном районе (Ni, Cu, Co, Zn), к ним присоединяется также Hg; 2) халькофильные элементы Pb и As, одним из основных источников поступления которых является воздушный перенос с других территорий. Эти две группы элементов также отличаются и корреляцией с морфометрическими характеристиками озер. Если первая группа имеет высокие коэффициенты корреляции с площадью водосборов и самих озер, то вторая группа — с высотой уреза воды над уровнем моря, что подтверждает наше предположение о разных путях поступления элементов в водоемы в естественных условиях. Первая группа поступает в водоемы главным образом путем выветривания горных пород водосбора озер, а вторая группа — за счет приноса воздушными массами с более удаленных территорий.

Таблица 2

Значения коэффициентов линейной корреляции концентраций ТМ в фоновых слоях ДО озер водосбора р. Нива, глубины станций отбора проб, глубины слоя в колонке ДО, площади водосбора озера, площади озера, отметки уреза воды в озере над уровнем моря и отношения площадей озера и водосбора озера. Корреляционная связь достоверно устанавливается при  $r > 0.30$  ( $p < 0.05$ ) для выборки  $n = 42$  (выделено жирным шрифтом)

Показатель	ППП	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
ППП	1.00								
Cu	<b>-0.32</b>	1.00							
Ni	-0.20	<b>0.58</b>	1.00						
Zn	0.02	0.27	0.24	1.00					
Co	-0.15	<b>0.50</b>	<b>0.75</b>	<b>0.58</b>	1.00				
Cd	<b>0.47</b>	-0.07	0.05	0.13	-0.05	1.00			
Pb	-0.19	0.11	-0.04	0.11	0.08	0.10	1.00		
As	-0.14	0.17	0.02	0.18	0.15	0.24	<b>0.75</b>	1.00	
Hg	0.08	<b>0.35</b>	<b>0.38</b>	<b>0.52</b>	<b>0.37</b>	<b>0.60</b>	-0.01	0.02	1.00
Глубина станции, м	-0.29	<b>0.35</b>	0.12	0.20	0.23	0.15	<b>0.53</b>	<b>0.59</b>	0.22
Слой, см	<b>0.33</b>	-0.25	-0.22	<b>-0.34</b>	-0.18	-0.23	-0.13	<b>-0.34</b>	-0.05
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	-0.22	0.15	<b>0.35</b>	<b>0.31</b>	<b>0.47</b>	-0.14	0.00	0.11	-0.05
Площадь озера, км <sup>2</sup>	-0.20	0.22	<b>0.31</b>	<b>0.38</b>	<b>0.46</b>	-0.03	-0.02	0.12	0.28
Уровень, м над ур. моря	-0.05	-0.04	-0.19	0.06	-0.11	0.15	<b>0.67</b>	<b>0.57</b>	-0.13
Площадь / водосбор	0.15	-0.11	-0.04	0.13	-0.09	0.24	0.04	-0.16	0.01

Таблица 3

Значения коэффициентов линейной корреляции концентраций ТМ в фоновых слоях ДО озер водосбора р. Тулома, глубины станций отбора проб, глубины слоя в колонке ДО, площади водосбора озера, площади озера, отметки уреза воды в озере над уровнем моря и отношения площадей озера и водосбора озера. Корреляционная связь достоверно устанавливается при  $r > 0.53$  ( $p < 0.05$ ) для выборки  $n = 12$  (выделено жирным шрифтом)

Показатель	ППП	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
Cu	-0.08	1.00							
Ni	-0.11	<b>0.95</b>	1.00						
Zn	-0.15	<b>0.89</b>	<b>0.90</b>	1.00					
Co	0.09	<b>0.65</b>	<b>0.72</b>	<b>0.80</b>	1.00				
Cd	0.34	0.04	-0.12	-0.07	-0.09	1.00			
Pb	0.15	0.37	0.42	<b>0.59</b>	<b>0.59</b>	0.29	1.00		
As	<b>-0.79</b>	<b>0.76</b>	<b>0.79</b>	<b>0.92</b>	<b>0.76</b>	0.26	<b>0.94</b>	1.00	
Hg	<b>-0.64</b>	<b>0.79</b>	<b>0.81</b>	<b>0.91</b>	<b>0.76</b>	0.24	<b>0.85</b>	<b>0.97</b>	1.00
Глубина станций, м	-0.36	<b>0.84</b>	<b>0.81</b>	<b>0.82</b>	0.50	-0.07	0.27	<b>0.55</b>	<b>0.53</b>
Слой, см	<b>0.72</b>	-0.02	-0.14	-0.26	-0.20	0.30	-0.19	-0.33	-0.12
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	<b>-0.59</b>	<b>0.74</b>	<b>0.72</b>	<b>0.75</b>	0.37	-0.27	0.21	<b>0.73</b>	<b>0.72</b>
Площадь озера, км <sup>2</sup>	<b>-0.58</b>	<b>0.75</b>	<b>0.72</b>	<b>0.75</b>	0.37	-0.26	0.22	<b>0.73</b>	<b>0.72</b>
Уровень, м над ур. моря	-0.07	-0.18	-0.16	0.00	-0.05	0.46	<b>0.64</b>	<b>0.69</b>	0.51
Площадь / водосбор	<b>-0.55</b>	<b>0.53</b>	0.47	0.48	0.12	0.08	0.28	<b>0.72</b>	<b>0.56</b>

В факторной модели химического состава фоновых слоев ДО озер водосбора р. Нива (табл. 4) наибольшим весом (30 %) обладает первый фактор, в котором наибольшие коэффициенты с отрицательными значениями имеют металлы, объединенные корреляционным



анализом в первую группу (Ni, Cu, Co, Zn), а также площадь озера. Это подтверждает версию о разных путях поступления элементов в водоемы в естественных условиях, а данную группу металлов — в результате выветривания минералов и горных пород, содержащих значительное количество этих металлов. Второй фактор объединяет содержание органического вещества (ППП) и халькофильные элементы — Cd, Hg, Pb, As. Третий фактор выделил высоту уреза воды озер над уровнем моря, т. е. одну из главных морфологических характеристик формирования химического состава озер, ответственную за дальний трансграничный перенос элементов воздушными массами, отмеченную Н. М. Страховым [25].

Таблица 4

Факторная модель химического состава фоновых слоев ДО озер водосбора р. Нива

Показатель	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
ППП	0.234	0.713	0.227
Cu	-0.696	-0.032	0.119
Ni	-0.777	0.142	-0.291
Zn	-0.601	0.466	0.386
Co	-0.806	0.347	-0.025
Cd	-0.575	0.694	0.050
Pb	-0.555	-0.527	0.143
As	-0.460	-0.504	0.407
Hg	-0.500	0.671	-0.097
Глубина станций, м	-0.514	-0.237	0.535
Слой, см	0.576	0.389	-0.102
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	-0.497	-0.413	-0.551
Площадь озера, км <sup>2</sup>	-0.626	-0.073	-0.459
Уровень, м над ур. моря	0.000	-0.219	0.895
Площадь / водосбор	0.165	0.576	0.215
Вес фактора, %	30.1	20.6	14.4

Таблица 5

Факторная модель химического состава фоновых слоев ДО озер водосбора р. Тулома

Показатель	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
ППП	0.645	-0.763	-0.032
Cu	-0.941	-0.323	0.101
Ni	-0.945	-0.297	0.136
Zn	-0.981	-0.027	0.192
Co	-0.960	-0.278	0.005
Cd	-0.697	-0.545	-0.470
Pb	-0.939	0.335	0.072
As	-0.868	0.289	0.404
Hg	-0.820	0.125	0.558
Глубина станций, м	-0.889	-0.360	-0.283
Слой, см	0.172	-0.954	0.244
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	-0.962	-0.263	-0.069
Площадь озера, км <sup>2</sup>	-0.964	-0.256	-0.072
Уровень, м над ур. моря	-0.790	0.502	-0.351
Площадь / водосбор	-0.845	0.422	-0.329
Вес фактора, %	72.6	19.8	7.7

Таким образом, установлено, что геохимический состав подстилающих коренных и четвертичных пород, воздушные переносы из соседних территорий, а также морфометрические характеристики озер являются определяющими факторами формирования химического состава фоновых ДО озер.

Концентрации элементов в фоновых слоях ДО служат маркером, по которому можно судить об интенсивности антропогенной нагрузки на территории водосбора и на сами озера, поэтому установленные в данной работе величины фоновых концентраций металлов в ДО озер имеют очень большую экологическую и геохимическую ценность. Исследуя вертикальное распределение металлов в толще ДО, можно восстановить историю событий, происходящих на территории водосбора конкретного озера с установлением источника поступления элементов.

#### *Вертикальное распределение элементов в донных отложениях*

В ДО исследуемых водоемов выявлено увеличение содержания ТМ в направлении к поверхности ДО. Вследствие незначительных скоростей осадконакопления наиболее загрязненными ТМ являются, как правило, верхние 1–5 см ДО. В озерах, принимающих сточные воды промышленных предприятий (Нюдъявр, Большой Вудъявр, Ковдор), ДО загрязнены на большую мощность — до 15 см (рис. 2). Встречаются также озера с повышенными скоростями седиментации (например Молевое), где загрязнены 10 см поверхностных ДО. Это, как правило, мелкие озера с высокой трофностью и высоким содержанием органического материала в ДО. Донные отложения практически всех озер загрязнены халькофильными элементами, в первую очередь Pb и Cd. К сожалению, не во всех озерах определялись концентрации Hg и As, но там, где они определены, их концентрации также увеличиваются в направлении к поверхности ДО. Таким образом, подтвердился результат исследований химического состава ДО озер северо-западной и восточной частей Мурманской обл., когда было установлено увеличение концентраций халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb и As) во всех исследуемых водных объектах вне зависимости от того, испытывают они аэротехногенную нагрузку или принимают сточные воды промышленных предприятий [16–20, 26]. Эти халькофильные элементы в последние десятилетия приобрели статус глобальных загрязняющих элементов [27].

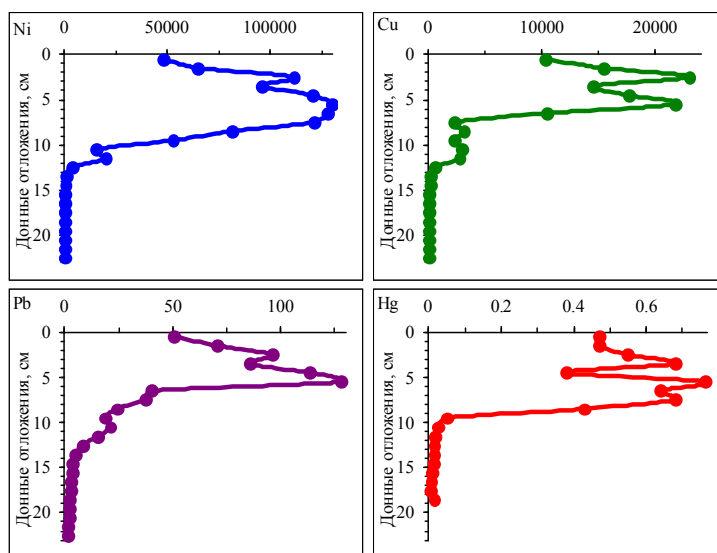


Рис. 2. Вертикальное распределение концентраций Ni, Cu, Pb, Hg (мкг/г сухого веса) в ДО оз. Нюд-явр

#### *Распределение элементов в поверхностном слое донных отложений*

Как было сказано выше, по факторам формирования химического состава ДО, в том числе и по источникам загрязнения, водосборы озер очень разнообразны, что отражается и в разнообразии химического состава ДО в поверхностных слоях, отражающих современное

состояние водосборов озер. В табл. 6 представлены результаты исследований содержания металлов в поверхностном 1-сантиметровом слое ДО озер водосборов рек Нива и Тулома. Водосборы этих рек отличаются как природными условиями формирования качества воды и ДО, так и степенью антропогенной нагрузки. Как было сказано выше, территория водосбора р. Нива индустриально интенсивно развита, уровень антропогенной нагрузки здесь намного выше, чем на водосборе р. Тулома (табл. 6). Средние и медианные значения концентраций ТМ в поверхностных ДО водосбора р. Нива намного выше, чем водосбора р. Тулома, например Ni — в 57 и 4 раза, Cu — в 23 и 4.5 раза, Co — в 5.6 и 4.6 раза, Pb — в 5.1 и 7.2 раза, As — в 6.1 и 4.3 раз соответственно.

Таблица 6

Концентрации ТМ и стандартное отклонение в поверхностном слое (0–1 см) ДО озер водосбора р. Нива (числитель) и озер водосбора р. Тулома (знаменатель)

Значение	ППП, %	Металлы, мкг/г сухого веса							
		Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
Среднее	<u>34.76</u>	<u>359</u>	<u>1312</u>	<u>108.1</u>	<u>40.9</u>	<u>1.04</u>	<u>24.5</u>	<u>6.0</u>	<u>0.151</u>
	30.03	15.4	23.1	54.7	7.3	0.93	4.8	1.0	0.104
Медианное	<u>26.16</u>	<u>55.8</u>	<u>87.8</u>	<u>100.8</u>	<u>18.4</u>	<u>0.39</u>	<u>18.1</u>	<u>4.2</u>	<u>0.096</u>
	27.65	12.5	21.5	44.7	4.0	0.47	2.5	1.0	0.104
Минимальное	<u>6.06</u>	<u>11.9</u>	<u>13.0</u>	<u>10.7</u>	<u>1.9</u>	<u>0.03</u>	<u>1.5</u>	<u>0.1</u>	<u>0.018</u>
	20.04	7.0	11.9	23.4	2.0	0.18	1.5	0.7	0.062
Максимальное	<u>96.40</u>	<u>10234</u>	<u>47805</u>	<u>270.0</u>	<u>661</u>	<u>14.37</u>	<u>101.6</u>	<u>39.1</u>	<u>1.133</u>
	44.09	34.0	43.0	109.0	34.0	3.12	14.0	1.3	0.145
Стандартное отклонение	<u>22.12</u>	<u>1503.5</u>	<u>7024.4</u>	<u>58.3</u>	<u>98.3</u>	<u>2.16</u>	<u>22.1</u>	<u>7.4</u>	<u>0.209</u>
	6.90	7.5	8.3	31.3	8.8	0.91	4.9	0.4	0.058

Ареалы высоких значений концентраций в поверхностных ДО исследуемых озер для тесно коррелируемых элементов Ni, Cu, Co и Hg совпадают и ограничиваются 40–50-километровой локальной зоной вокруг металлургических предприятий (рис. 3), как это было отмечено предыдущими исследованиями вокруг комбината «Печенганикель» [17, 20, 28, 29].

Увеличение содержаний Pb прослеживается с востока на запад, что отражает общий поток переноса загрязняющих веществ из центра Европы на северо-восток в Арктику. Наряду с Pb, Cd также является глобальным загрязнителем [16], поэтому Cd не показал зависимости концентраций в поверхностных слоях от расстояния от источника загрязнения. Вследствие наличия большого количества источников поступления ТМ в окружающую среду (ОАО «Апатит», ОАО «Олкон», Ковдорский ГОК, Кандалакшский алюминиевый завод, а также Кольская АЭС, Апатитская ТЭЦ и другие энергетические предприятия, в том числе котельные, работающие на угле и мазуте), преобладающие загрязняющие ТМ, Ni и Cu, не имели таких высоких зависимостей концентраций в поверхностных слоях ДО от расстояния от главного источника выбросов ТМ, комбината «Североникель», как это было обнаружено на территории северо-запада Мурманской области, где главным источником поступления ТМ является комбинат «Печенганикель» и другие источники имеют подчиненное значение или расположены рядом с ним [17, 28, 29]. Но величина достоверности аппроксимации регрессионных уравнений зависимости концентраций ТМ в поверхностных слоях ДО от расстояния от источника загрязнения (комбината «Североникель») достаточно высокая, прежде всего для приоритетных загрязняющих элементов Ni и Cu, а также для Co и Hg и немного меньше для As. Это говорит в пользу вывода, что комбинат «Североникель» — основной источник загрязнения Ni, Cu, Co, Hg и As водосборов озер юго-западной и центральной частей Мурманской обл.

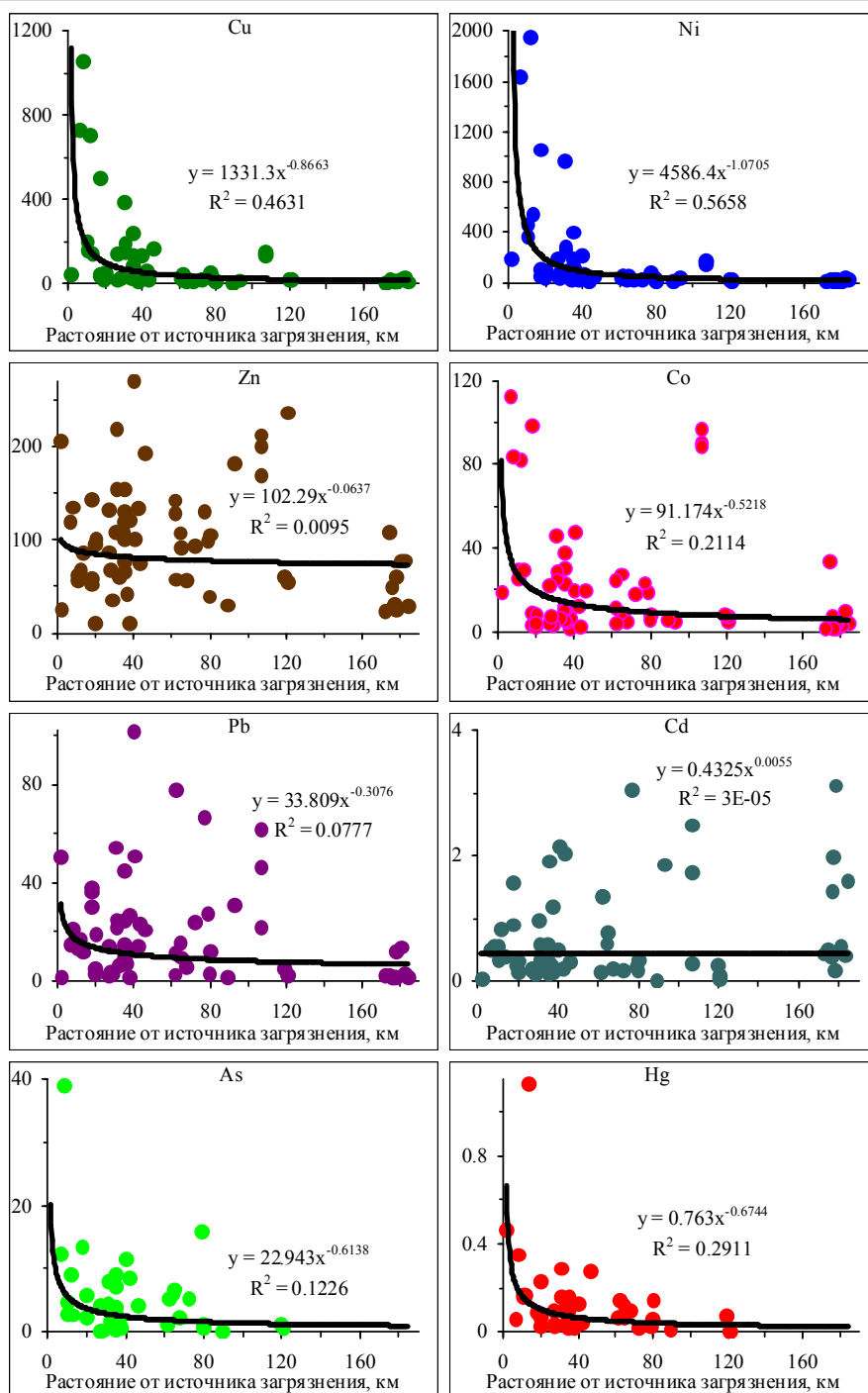


Рис. 3. Распределение концентраций основных загрязняющих элементов в поверхностном слое (0-1 см) ДО исследуемых озер по мере удаления от основного источника загрязнения — комбината «Североникель»

Корреляционный анализ также выделил группу ТМ, имеющих высокие достоверные корреляционные связи (табл. 7). К ней относятся, прежде всего, загрязняющие ТМ, основной источник которых — выбросы комбината «Североникель» (Ni и Cu), а также отмеченные ранее Co, Hg и As. Выявлена высокая корреляция содержаний Pb в поверхностном слое (0-1 см) ДО и высоты уреза воды озера над уровнем моря, что говорит в пользу высказанной ранее идеи, что этот халькофильный элемент привносится на территории водосборов озер главным образом

воздушными массами с более удаленных территорий. В виде атмосферных выпадений металл достигает территории водосборов и далее, мигрируя в поверхностном стоке, попадает в озеро.

Таблица 7

Значения коэффициентов линейной корреляции величин ППП, концентраций ТМ в поверхностном слое (0–1 см) ДО озер центральной и юго-западной частей Мурманской обл., расстояния от станции отбора пробы до комбината «Североникель», площади водосбора озера, площади озера, отметки уреза воды в озере над уровнем моря и отношения площадей озера и водосбора озера. Корреляционная связь достоверно устанавливается при  $r > 0.25$  ( $p < 0.05$ ) для выборки  $n = 64$  (выделено жирным шрифтом)

Показатель	ППП	Cu	Ni	Zn	Co	Cd	Pb	As	Hg
Cu	0.03	1.00							
Ni	0.04	<b>1.00</b>	1.00						
Zn	<b>-0.36</b>	0.26	0.24	1.00					
Co	-0.06	<b>0.97</b>	<b>0.96</b>	<b>0.36</b>	1.00				
Cd	0.01	<b>0.91</b>	<b>0.91</b>	<b>0.28</b>	<b>0.89</b>	1.00			
Pb	-0.13	0.21	0.20	<b>0.55</b>	<b>0.28</b>	<b>0.37</b>	1.00		
As	-0.13	<b>0.79</b>	<b>0.71</b>	<b>0.35</b>	<b>0.66</b>	<b>0.36</b>	<b>0.36</b>	1.00	
Hg	-0.14	<b>0.31</b>	<b>0.30</b>	0.22	<b>0.32</b>	<b>0.30</b>	0.18	0.19	1.00
Расстояние от станции отбора, км	-0.11	-0.20	-0.17	-0.18	-0.21	-0.04	-0.24	<b>-0.29</b>	<b>-0.35</b>
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	-0.23	-0.03	-0.04	0.10	0.03	0.01	0.12	0.21	-0.03
Площадь озера, км <sup>2</sup>	<b>-0.25</b>	-0.01	-0.02	0.20	0.06	-0.02	0.16	0.20	0.01
Уровень, м над ур. моря	-0.05	-0.08	-0.08	<b>0.28</b>	-0.09	-0.04	<b>0.45</b>	0.12	-0.04
Площадь / водосбор	0.22	-0.04	-0.04	-0.04	-0.08	0.01	0.00	0.21	-0.08

В факторной модели химического состава в поверхностном слое (0–1 см) ДО (табл. 8) с весом (35 %) преобладает первый фактор, в котором наибольшие коэффициенты имеют металлы, объединенные корреляционным анализом в первую группу: Ni, Cu, Co, As, а также расстояние от источника загрязнения с отрицательным значением. Это подтверждает версию о поступлении данной группы металлов в результате выбросов источниками загрязнения, в первую очередь комбинатом «Североникель». Второй фактор объединяет содержание органического вещества (ППП), Zn и Pb (металлы с отрицательным значением). Свинец, как и говорилось ранее, имеет другой главный источник поступления. Это, скорее всего, глобальное загрязнение Северного полушария этим элементом, а также поступление от местных источников, таких как энергетические установки, в том числе передвижной транспорт и котельные, на которых сжигается твердое и жидкое топливо с высоким содержанием Pb. Третий фактор выделил площади водосбора и озер — главные морфологические характеристики формирования химического состава ДО озер, отмеченные Н. М. Страховым [25].

#### Коэффициент и степень загрязнения донных отложений озер

Для оценки геоэкологического состояния исследуемых озер центральной и юго-западной частей Мурманской обл. определялись величины коэффициента и степени загрязнения [30], как это было сделано в ранее опубликованных статьях [17–19]. Коэффициент загрязнения ( $C_f^j$ ) подсчитывался как частное от деления концентрации элемента в поверхностном сантиметровом слое к фоновому значению. Степень загрязнения ( $C_d$ ) определялась как сумма коэффициентов загрязнения для всех загрязняющих ТМ.

Факторная модель химического состава в поверхностном слое (0-1 см) ДО озер центрального и юго-западного районов Мурманской обл.

Показатель	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
ППП	-0.255	-0.389	-0.630
Cu	0.922	-0.285	-0.041
Ni	0.890	-0.361	-0.043
Zn	0.429	0.723	0.123
Co	0.920	-0.214	0.125
Cd	0.601	0.045	-0.386
Pb	0.419	0.719	-0.275

Окончание таблицы 8

As	0.822	0.022	-0.017
Hg	0.342	-0.040	-0.030
Расстояние от станции отбора, км	-0.513	0.242	0.293
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	0.220	0.095	0.740
Площадь озера, км <sup>2</sup>	0.328	0.134	0.622
Уровень, м над ур. моря	0.123	0.746	-0.443
Площадь / водосбор	0.137	0.047	-0.312
Вес фактора, %	32.3	15.0	14.1

В исследуемых озерах отмечено уменьшение значений степени загрязнения по мере удаления от основного источника загрязнения — комбината «Североникель» (рис. 4).

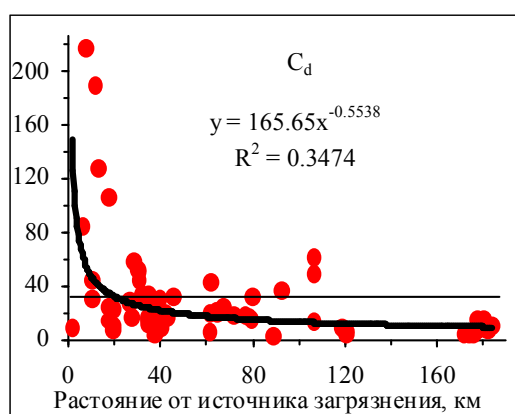


Рис. 4. Распределение величин степени загрязнения ( $C_d$ ) исследуемых озер по мере удаления от основного источника загрязнения — комбината «Североникель». Прямая линия соответствует высокой степени загрязнения ( $C_d \geq 32$ ), свидетельствующей о серьезном загрязнении озера и его водосбора

Значения степени загрязнения не показали высоких зависимостей от расстояния от главного источника выбросов ТМ, комбината «Североникель», как это было обнаружено на территории северо-запада Мурманской обл., где главным источником поступления ТМ является комбинат «Печенганикель», а другие источники имеют подчиненное значение или расположены рядом с ним [17]. Но величина достоверности аппроксимации регрессионного уравнения зависимости значений степени загрязнения от расстояния до источника загрязнения достаточно высока, вследствие чего можно сделать вывод, что комбинат «Североникель» является основным источником поступления ТМ на водосборы озер юго-западной и центральной частей Мурманской обл. Высокие значения степени загрязнения отмечены в озерах на

расстоянии до 40 км от комбината «Североникель», хотя и в более удаленных озерах также отмечено высокое загрязнение. Это, в первую очередь, озера, принимающие стоки промышленных предприятий: Ковдор (Ковдорский ГОК), Большой Вудъявр (ОАО «Апатит»).

Наибольшие величины коэффициента загрязнения в озерах вблизи комбината «Североникель» имеют приоритетные загрязняющие ТМ — Ni, Cu и Co. В озерах, удаленных на расстояние более 40 км, наибольшие величины коэффициента загрязнения отмечены для Pb. Существенное загрязнение также оказывают другие исследуемые халькофильные элементы — Cd, Hg, As. Величины коэффициентов загрязнения этими элементами для более чем половины озер относятся к значительным и высоким по классификации [30]. Приоритетные для Мурманской обл. загрязняющие ТМ в преобладающем большинстве озер на расстоянии более 40 км от комбината «Североникель» имеют умеренные величины коэффициента загрязнения.

Таким образом, практически во всех исследуемых озерах зафиксировано загрязнение ДО халькофильными элементами различной степени — от умеренного до высокого, причем не всегда это напрямую связано с точечными источниками загрязнения. Хотя по зависимостям концентрации Hg в поверхностном слое ДО от удаления от комбината «Североникель» можно предположить, что он также является одним из источников поступления этого халькофильного элемента в озера. В ранних работах [16–20, 26] было также установлено, что загрязнение халькофильными элементами в основном носит глобальный характер, в отличие от других ТМ, таких как Ni, Cu, Co, загрязнение которыми воды и ДО озер явно проявляется в радиусе нескольких десятков километров от основного источника загрязнения — комбината «Североникель».

### **Заключение**

Центральная и юго-западная часть Мурманской обл. представлены в основном водосборами двух рек — Туломы и Нивы. Эта часть Мурманской обл., особенно водосбор р. Нива, индустриально интенсивно развита. Здесь располагаются главные источники загрязнения Мурманской обл., оказывающие большое влияние на формирование химического состава современных ДО. Геохимический состав подстилающих коренных и четвертичных пород, воздушные переносы из соседних территорий, а также морфометрические характеристики озер являются определяющими факторами формирования химического состава фоновых слоев ДО озер. В целом средние фоновые концентрации ТМ в ДО озер центральной и юго-восточной частей Мурманской обл. подобны или ниже, чем в малых озерах Мурманской обл., определенные в результате предыдущих исследований. В ДО исследуемых водоемов, особенно на водосборе р. Нива, выявлено увеличение содержания ТМ в направлении к поверхности ДО. Вследствие незначительных скоростей осадконакопления наиболее загрязненными ТМ являются, как правило, верхние 1–5 см ДО. В озерах, принимающих сточные воды промышленных предприятий, ДО загрязнены на глубину до 15 см. В мелких озерах с высокой трофностью и высоким содержанием органического материала скорости седиментации повышены, и в них загрязнены верхние 10 см ДО. Водосбор р. Нива характеризуется более высоким уровнем антропогенной нагрузки, чем водосбор р. Тулома, поэтому в его водоемах средние и медианные значения концентраций ТМ в поверхностных ДО выше, чем в водоемах водосбора р. Тулома, например, Ni — в 57 и 4 раза, Cu — в 23 и 5 раз, Co — в 6 и 5 раз, Pb — в 5 и 7 раз, As — в 6 и 4 раза соответственно. Ареалы высоких значений концентраций тесно коррелируемых ТМ Ni, Cu, Co, As и Hg в поверхностных ДО исследуемых озер совпадают и ограничиваются 40–50-километровой локальной зоной вокруг металлургических предприятий. Pb и Cd, являясь глобальными загрязняющими металлами, не показали зависимости концентраций в поверхностных слоях ДО от расстояния до источника загрязнения. Значения степени загрязнения не имеют высоких зависимостей от расстояния от главного источника выбросов ТМ, комбината «Североникель», как это было обнаружено на территории северо-запада Мурманской обл., где главным источником поступления ТМ является комбинат «Печенганикель», а другие источники имеют подчиненное значение или расположены рядом с ним. Но величина достоверности

аппроксимации регрессионного уравнения зависимости значений степени загрязнения от расстояния до источника загрязнения все же достаточно высока для того, чтобы сделать заключение, что комбинат «Североникель» является основным источником загрязнения ТМ водосборов озер юго-западной и центральной частей Мурманской обл. на расстоянии до 40–50 км.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ресурсы поверхностных вод СССР / Т. С. Антонова [и др.]. Л.: Гидрометеиздат, 1970. Т. 1. 316 с.
2. Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
3. Долговременные изменения биологического разнообразия водоемов Лапландского биосферного заповедника как индикаторы фоновых изменений: отчет о НИР / ИППЭС КНЦ РАН. Апатиты, 2000. 279 с.
4. Подготовительный предпроектный мониторинг состояния поверхностных вод в зоне влияния ОАО «Ковдорский ГОК»: отчет о НИР / ИППЭС КНЦ РАН. Апатиты, 2002. 197 с.
5. Исследование состояния северной части оз. Нюд-явр и разработка практических рекомендаций по снижению поступления загрязняющих веществ на контрольный створ: отчет о НИР / ИППЭС КНЦ РАН. Апатиты, 2006. 152 с.
6. Инженерно-экологические изыскания по объекту «Внешние отвалы вскрышных пород карьера Восточного участка Южно-Кахозерского месторождения» в Оленегорском районе: отчет о НИР. Апатиты: ИППЭС КНЦ РАН, 2010. 252 с.
7. Оценка современного состояния и самоочищающей способности поверхностных вод в зоне деятельности промышленных объектов ОАО «Апатит»: отчет о НИР. Апатиты: ИППЭС КНЦ РАН, 2013. 273 с.
8. Формирование качества вод и донных отложений в условиях антропогенных нагрузок на водоемы арктического бассейна (на примере Кольского Севера) / Т. И. Моисеенко [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. 263 с.
9. Антропогенные изменения лотических экосистем Мурманской области. Ч. 1: Ковдорский район / Н. А. Кашулин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. 234 с.
10. Антропогенные изменения лотических экосистем Мурманской области. Ч. 2: Озерно-речная система реки Чуна в условиях аэротехногенного загрязнения / Н. А. Кашулин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2007. 238 с.
11. Антропогенные изменения водных систем Хибинского горного массива (Мурманская область): в 2 ч. / Н. А. Кашулин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. Ч. 1. 250 с.; ч. 2. 282 с.
12. Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2012. 242 с.
13. Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области: центральный и юго-западный районы Мурманской области (бассейны Баренцева и Белого морей и Ботнического залива Балтийского моря): в 2 ч. / Н. А. Кашулин [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2013. Ч. 1. 298 с.; ч. 2. 253 с.
14. Даувальтер В. А., Даувальтер М. В. Геоэкологическая оценка состояния природных вод в зоне влияния комбината «Североникель». Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2014. 216 с.
15. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Геоэкология озер Мурманской области: в 3 ч. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2014. Ч. 1. 188 с.; ч. 2. 222 с.; ч. 3. 214 с.
16. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Биогеохимические особенности распределения халькофильных элементов (Hg, Cd, Pb, As) в водоемах Севера европейской части России. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та, 2015. 136 с.
17. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Основные закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер северо-западной части Мурманской области и приграничной территории сопредельных стран // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 1. С. 101–112.
18. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Основные закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер северо-восточного района Мурманской области бассейна Баренцева моря // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 1. С. 69–80.
19. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях озер восточной части Мурманской области бассейна Белого моря // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016.
20. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Сандимиров С. С. Тенденции изменений химического состава донных отложений пресноводных Субарктических и Арктических водоемов под влиянием природных и антропогенных факторов // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Вып. 1. 2012. № 2 (9). С. 54–87.
21. Trace metal pollution in Eastern Finnmark, Norway, as evidenced by studies of lake sediments / S. A. Norton, A. Henriksen, P. G. Appleby, L. L. Ludwig, D. V. Vereault, T. S. Traaen. Oslo: SFT-report 487/92, 1992. 42 p.
22. Trace metal pollution in Eastern Finnmark, Norway and Kola Peninsula, Northeastern Russia as evidences by studies of lake sediment / S. A. Norton, P. G. Appleby, V. Dauvalter, T. S. Traaen // NIVA-Report 41/1996. Oslo, 1996. 18 p.
23. Rognerud S., Norton S. A., Dauvalter V. Heavy metal pollution in lake sediments in the border areas between Russia and Norway. Oslo: NIVA-Report 522/ 93, 1993. 18 p.
24. Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области / Н. А. Кашулин [и др.] // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, №1. С. 98–107.
25. Образование осадков в современных водоемах / Н. М. Страхов [и др.]. М.: АН СССР, 1954. 792 с.
26. Даувальтер В. А. Халькофильные элементы (Hg, Cd, Pb, As) в донных отложениях водных объектов водосбора Белого моря в пределах Кольского полуострова. Геохимия. 2006. № 2. С. 237–240.
27. Pacyna J. M., Pacyna E. G. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide // Environmental Reviews. 2001. Vol. 4. P. 269–298.
28. Dauvalter V. Heavy metals in lake sediments of the Kola peninsula, Russia // Sci. Total Environ. 1994. Vol. 158. P. 51–61.
29. Dauvalter V., Rognerud S. Heavy metals pollution in sediment of the Pasvik River drainage // Chemosphere. 2001. Vol. 42, № 1. P. 9–18.
30. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control — a sedimentological approach // Water Res. 1980. Vol. 14. P. 975–1001.



**Сведения об авторах**

*Даувальтер Владимир Андреевич* — доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН;

e-mail: vladimir@inep.ksc.ru

*Кашулин Николай Александрович* — доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией водных экосистем, заместитель директора по научной работе Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН;

e-mail: nikolay@inep.ksc.ru

**Author Affiliation**

*Vladimir A. Dauvalter* — Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Major Researcher of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS;

e-mail: vladimir@inep.ksc.ru

*Nikolay A. Kashulin* — Dr. Sci. (Biol.), Professor, Head of Laboratory on Aquatic Ecosystems, Vice Director on Science of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS;

e-mail: nikolay@inep.ksc.ru

**Библиографическое описание статьи**

*Даувальтер, В. А.* Тяжелые металлы в донных отложениях озер центральной и юго-западной частей Мурманской области / *В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 3 (26). — С. 73–88.

**Reference**

*Dauvalter Vladimir A., Kashulin Nikolai A.* Heavy Metals in Lake Sediments of the Central and Southwest Parts of the Murmansk Region. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 3 (26), pp. 73–88. (In Russ.).

УДК 551.588.7

## ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА НА МИКРОКЛИМАТИЧЕСКУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЗИМНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ГОРОДЕ АПАТИТЫ

В. И. Демин<sup>1</sup>, Б. В. Козелов<sup>1</sup>, Н. И. Елизарова<sup>2</sup>, Ю. В. Меньшов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ Полярный геофизический институт

<sup>2</sup>АМСГ «Апатиты» СЗФ ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»

<sup>3</sup>Территориально-ситуационный центр ФКУ Упрдор «Кола»

### Аннотация

По результатам измерений, выполненных в зимние сезоны 2014–2016 гг., обнаружено, что температура воздуха в г. Апатиты на 1–2 °С выше, чем в пригородах. В отдельные моменты разность температуры между городом и фоновыми районами может достигать 10–15 °С. Явление создается стоком холодного воздуха в низины, возникающим из-за положения центра города в верхней части обширного холма. Наблюдаемые вариации температуры воздуха в городе не выходят из характерного диапазона ее естественной микроклиматической изменчивости в холмистой местности.

### Ключевые слова:

*микроклимат, климат города, городской остров тепла.*

## TOPOGRAPHY INFLUENCE ON MICROCLIMATIC VARIATION OF WINTER AIR TEMPERATURE IN APATITY TOWN

Valery I. Demin<sup>1</sup>, Boris V. Kozelov<sup>1</sup>, Natalia I. Elizarova<sup>2</sup>, Jury V. Menshov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Polar Geophysical Institute of the KSC of the RAS

<sup>2</sup>CAMS "Apatity", FSBE "Aviamettelecom of Roshydromet", North-Western Branch

<sup>3</sup>Territorial-Situational Center, Uprдор "Kola"

### Abstract

Winter air temperatures in Apatity town (Murmansk region) are 1–2 °C warmer than its surrounding rural sites. In extreme cases, temperature difference between the town centre and suburb reaches up to 10–15 °C. This phenomenon is caused by cold air outflow as town is located on the upper part of a hill. Temperature differences do not exceed the permissible range of natural temperature variations for a hilly area.

### Keywords:

*microclimate, urban climate, urban heat island.*

### Введение

Характерная черта климата городов — существование городского «острова тепла», который проявляется в виде области повышенных значений температуры воздуха над районами городской застройки. Его возникновение вызвано целым рядом различных факторов:

- конструкции зданий и сооружений и асфальтированные поверхности за счет поглощения солнечной энергии днем накапливают большое количество тепла, которое расходуется вечером и ночью на обогрев приземного слоя воздуха;
- уходящее длинноволновое излучение перехватывается стенами зданий и загрязненным городским воздухом;
- скорости ветра в городе в целом ниже, что способствует сохранению нагретого воздуха внутри застройки;
- в городе меньше затраты тепла на испарение за счет сокращения площадей с открытой почвой или занятых растительностью и быстрого отвода осадков канализацией;

• выделение антропогенного тепла в результате работы промышленности, транспорта, жилищно-коммунального хозяйства.

Из перечисленного списка видно, что основная причина возникновения «острова тепла» — модификация подстилающей поверхности городской застройкой, приводящая к изменению теплового баланса местности, и выделение техногенного тепла. В этой связи городской «остров тепла» рассматривается как один из самых наглядных примеров мезомасштабного изменения климата в результате деятельности человека [1].

Целью данной работы является изучение вариаций зимней температуры воздуха в г. Апатиты. Необходимость такого исследования обусловлена тем, что по материалам экспедиционных работ [2, 3] в г. Апатиты, несмотря на его небольшой размер и отсутствие внутри крупных промышленных предприятий, в зимнее время выявлен «остров тепла», средняя интенсивность которого  $3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  [2] заметно превышает значения, характерные для городов Европы ( $0.4\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4]). С учетом того что «остров тепла» в городе обнаружен по довольно ограниченным материалам полевых измерений температуры воздуха и по анализу теплового излучения подстилающей поверхности, которое нелинейно связано как с ее температурой, так и с температурой воздуха, необходимо установить, как «остров тепла» проявляется при регулярных метеорологических наблюдениях.

### Исходные данные

В работе использованы данные стационарных и маршрутных измерений температуры воздуха в г. Апатиты, проводимых Полярным геофизическим институтом, на гидрометеорологической станции «Апатиты» (ГМС «Апатиты»), авиационной метеорологической станции гражданской (АМСГ) «Апатиты», а также данные Территориально-ситуационного центра ФКУ Упрдор «Кола».

### Результаты и обсуждение

По результатам измерений в 2014–2016 гг. обнаружено, что на территории г. Апатиты температура воздуха зимой на  $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше, чем над окружающей местностью. Причем при установлении тихой и малооблачной погоды разность температур между городом и ближайшими пригородами увеличивается до  $5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а ее максимальное зарегистрированное значение составило  $13.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

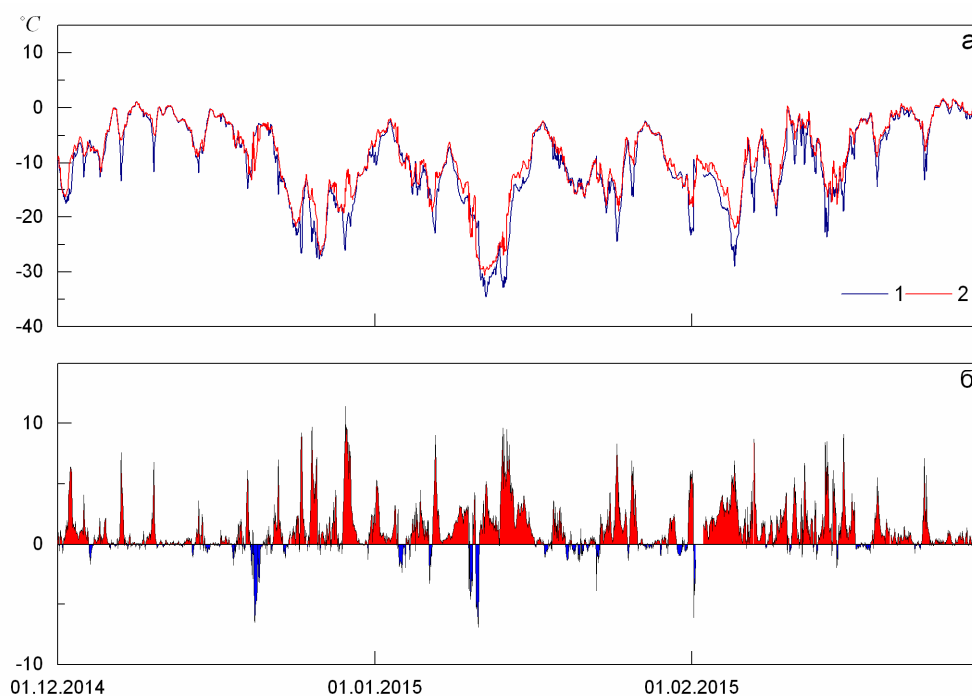


Рис. 1. Температура воздуха на АМСГ «Апатиты» и в г. Апатиты (а) и их разность (б) в период 01.12.2014 — 28.02.2015; АМСГ «Апатиты» (1), г. Апатиты (2)

Для иллюстрации на рис. 1 показаны вариации температуры воздуха в период с 01.12.2014 по 28.02.2015 в г. Апатиты на территории Академгородка и на АМСГ «Апатиты», удаленной на 15 км к юго-востоку.

Частотное распределение возможных разностей температуры между Академгородком и АМСГ «Апатиты», Академгородком и расположенной в 2.5 км от него ГМС «Апатиты» представлено на рис. 2. Большая разность между Академгородком и пригородами возникает на фоне установившихся в регионе низких температур воздуха (рис. 1) в условиях тихой и малооблачной погоды (рис. 3, а, б).

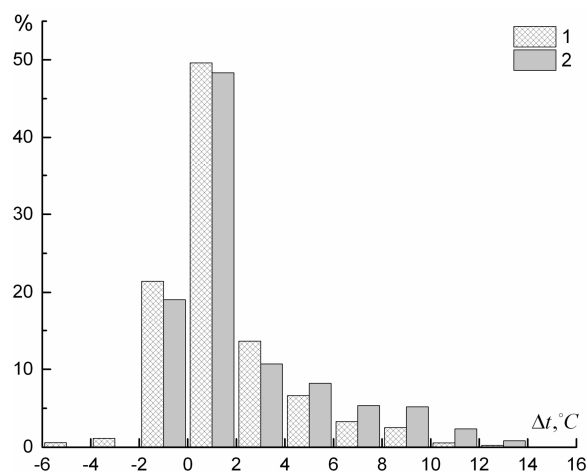


Рис. 2. Распределение наблюдаемых разностей температур между Академгородком и АМСГ «Апатиты» (1) и Академгородком и ГМС «Апатиты» (2), декабрь — февраль

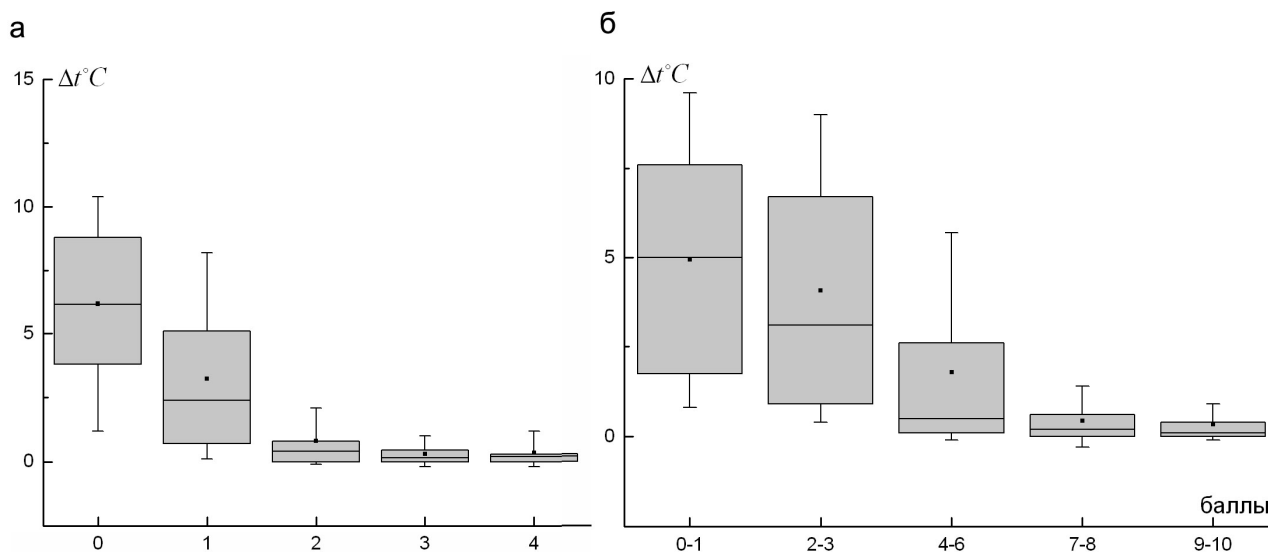


Рис. 3. Разность температур между Академгородком и ГМС «Апатиты» в зависимости от скорости ветра (а) и количества нижней облачности на ГМС «Апатиты» (б). На бокс-диаграммах прямоугольниками выделена область, заключенная между первым (25 %) и вторым (75 %) квантилями; выносными линиями отмечена область 10–90 %, проведена медианная линия и отмечено среднее значение в градации (■)

Положительную разность температуры воздуха между центральной частью города и его пригородами трактуют как проявление городского «острова тепла». Однако в случае г. Апатиты данное явление имеет другое объяснение.

Апатиты (за исключением так называемого района «Старые Апатиты») занимает верхнюю часть довольно обширного холма (рис. 4). Городская застройка начинается с отметок 155–160 м, а центральная часть города расположена на высотах 180–200 м н. у. м. Наименьшая высотная отметка в исследуемом районе — 126.7 м н. у. м. (урез воды в о. Имандра). Таким образом, для выявления физических причин возникновения пространственных аномалий температуры воздуха в г. Апатиты и его окрестностях необходимо привлечь к рассмотрению особенности микроклимата холмистого рельефа.

В климатологии к холмистому рельефу относят пересеченный рельеф, характеризующийся относительными разностями высот не более 150 м и крутизной склонов меньшей или равной  $10^\circ$  [5]. В этих условиях влияние абсолютной высоты перекрывается микроклиматическими особенностями, создаваемыми формами рельефа и экспозицией склонов (влияние высотного градиента на термический режим обычно начинает четко проявляться только при разностях высот, превышающих 200–250 м [5]).



Рис. 4. Топографическая карта г. Апатиты и окрестностей

Летом в холмистом рельефе термические различия, возникающие в дневные часы даже при ясном небе, относительно невелики и варьируют в диапазоне от  $0.5$  до  $1.5^\circ\text{C}$ . Это объясняется тем, что на пологих склонах различия в приходе солнечной радиации малы и не превышают нескольких процентов. Кроме того, при характерных для региона скоростях ветра более  $2\text{--}3$  м/с создается хорошее турбулентное перемешивание, которое сглаживает термические различия по элементам рельефа.

Однако в холодное время года картина существенно меняется. В ясную и тихую погоду за счет радиационного излучения поверхности приземный слой воздуха сильно охлаждается, становится более плотным и начинает стекать вниз по склонам, заполняя понижения рельефа и формируя так называемые «озера холода». Верхняя часть холма при этом остается более теплой, чем его подножие, так как стекающий воздух заменяется более теплым из прилегающих слоев атмосферы. Такое перераспределение холодного воздуха в холмистом рельефе становится причиной больших горизонтальных градиентов температуры [5–8]. Начало стоковых явлений возможно уже при углах наклона порядка нескольких градусов и при относительных превышениях  $10\text{--}12$  м.

Разность температуры вдоль склонов зависит от топографии и метеорологических условий. Но в среднем при отсутствии стоковых течений она довольно небольшая и редко превышает

0.5 °С. При появлении склоновых ветров температура увеличивается до 4–5 °С, а в отдельных случаях и до 8–12 °С [7].

В Апатитах появлению стоковых течений зимой способствует круглосуточный отрицательный радиационный баланс, благодаря которому при установлении продолжительной антициклонической погоды с ясным небом и слабыми ветрами интенсивное охлаждение подстилающей поверхности и прилегающих слоев воздуха наблюдается непрерывно в течение многих часов и даже дней. Из-за возникающего стока выхолаженного воздуха (в долину р. Жемчужная и в сторону о. Имандра) центральная и одновременно самая высокая часть города оказывается теплее периферийных районов и пригородов. Таким образом, возникновение зимой в г. Апатиты теплой области обусловлено геоморфологическими особенностями территории.

Аналогичное распределение температуры наблюдается в других холмистых районах Кольского п-ова. Для примера показана разность температур между двумя автоматическими дорожными метеостанциями (АДМС), установленными на федеральной трассе «Кола» на расстоянии 30 км друг от друга (рис. 5). Одна из них (АДМС «1166+750») примерно на 50–60 м приподнята над прилегающей равниной, а вторая (АДМС «1203+350») расположена у берега о. Имандра (140 м н. у. м.). В данном случае за счет рельефа разности температур между выбранными АДМС достигают 10–15 °С.

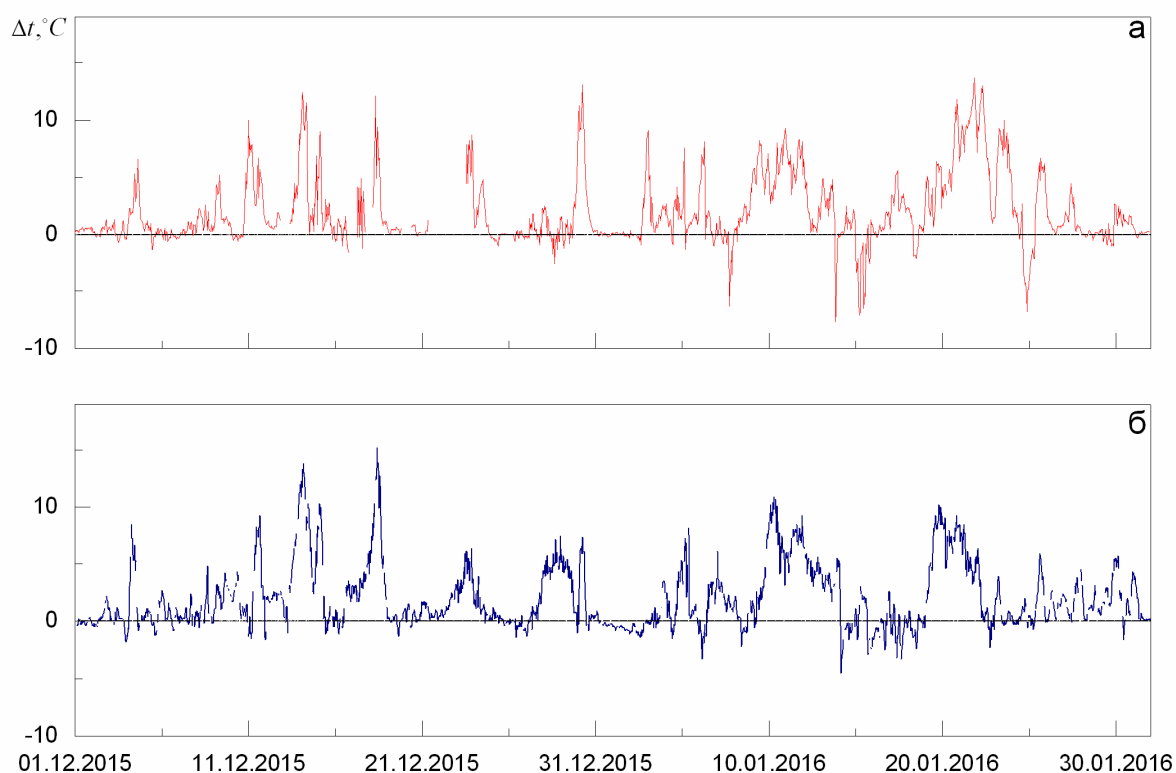


Рис. 5. Разность температур между Академгородком и АМСГ «Апатиты» (а) и между АДМС «1166+750» и «1203+350» на автомобильной дороге М-18 "Кола" (б) с 01.12.2015 по 31.01.2016 г.

При сравнении динамики разности температур между метеорологической станцией в Академгородке (200 м н. у. м.) и АМСГ «Апатиты» (160 м н. у. м.) с динамикой разности температур между АДМС «1166+750» и АДМС «1203+350» нетрудно заметить, что сильные вариации часто совпадают по времени (рис. 5). Это объясняется тем, что благоприятная для радиационного выхолаживания синоптическая ситуация, инициирующая перераспределение холодного воздуха по элементам рельефа, одновременно охватывает значительную территорию. Полной синхронности между разностями нет и, строго говоря, не должно быть, так как

интенсивность стоковых течений зависит от местных особенностей и от комплекса метеорологических условий. Например, течение холодного воздуха направлено перпендикулярно изогипсам, и в зависимости от направления основного (ветрового) потока в различных местоположениях создаются условия, благоприятствующие или препятствующие его возникновению [6]. При сопоставлении масштаба наблюдаемых разностей на рис. 5 можно убедиться, что вариации температуры между Академгородком и АМСГ «Апатиты» (или ГМС «Апатиты») не выходят за пределы ее естественной микроклиматической изменчивости в холмистом рельефе.

Многочисленные полевые исследования, выполненные в разных регионах, показывают, что основные климатические показатели из-за микроклиматической неоднородности на близких расстояниях могут изменяться сильнее, чем при переходе из одной климатической зоны в другую [7]. Например, в работе [9] сообщается, что в условиях даже очень выровненного участка протяженностью около 500 м и с перепадом высот 20 м разность минимальных температур при ясной штилевой погоде во все сезоны превышала 5–6 °С. Заметим, что средняя интенсивность «острова тепла» для городов с миллионным населением порядка 1–2 °С. При анализе показаний 289 станций США, объединенных в 40 городских кластеров, получено заключение, что локальные воздействия на температурный режим в городах США доминируют над мезомасштабными воздействиями [10]. Ситуация осложняется тем, что и «остров тепла», и микроклиматическая неоднородность территории в наибольшей степени проявляются при схожих метеорологических условиях. В этой связи установление физических причин формирования температурных аномалий в городе невозможно без проведения микроклиматических съемок.

### Выводы

Рассмотрена динамика температуры воздуха в г. Апатиты и его пригородах в зимние сезоны 2014–2016 гг. Обнаружено, что температура воздуха в г. Апатиты в среднем на 1–2 °С выше, чем над окружающей местностью, причем в отдельные моменты разность температур между центральной частью города и его пригородами может достигать 10–15 °С. Данное явление вызывается положением города в верхней части холма и стоком холодного воздуха в низины и не может рассматриваться как доказательство антропогенного воздействия городской среды на термический режим приземного слоя воздуха. Наблюдаемые разности температур между г. Апатиты и его ближайшими пригородами не выходят из характерного диапазона микроклиматической изменчивости зимней температуры в холмистом рельефе.

Проведенное исследование показывает, что распространенная практика изучения городского «острова тепла» путем сопоставления измерений температуры воздуха в разных районах города без проведения микроклиматических изысканий в условиях холмистого рельефа и неоднородной подстилающей поверхности может оказаться не вполне корректной процедурой.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Оке Т. Р. Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 360 с.
2. Константинов П. И., Грищенко М. Ю., Варенцов М. И. Картографирование островов тепла городов Заполярья по совмещенным данным полевых измерений и космических снимков на примере г. Апатиты (Мурманская область) // Исследование Земли из космоса. 2015. № 3. С. 27–33.
3. Konstantinov P. I., Grishchenko M. Y., Varentsov M. I. Mapping urban heat islands of arctic cities using combined data on field measurements and satellite images based on the example of the city of Apatity (Murmansk oblast) // Izvestiya RAS — Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. Vol. 51, No. 9. P. 992–998.
4. Surface urban heat island across 419 global big cities / S. Peng [et al.] // Environ. Sci. & Technol. 2011. Vol. 46, No. 2. P. 696–703.
5. Гольцберг И. А. Микроклимат СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 282 с.
6. Гейгер Р. Климат приземного слоя воздуха. М.: Иностранная литература, 1960. 480 с.
7. Романова Е. Н., Мосолова Г. И., Берсенева И. А. Микроклиматология и ее значение для сельского хозяйства. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 246 с.
8. Мищенко З. А. Биоклимат дня и ночи. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 280 с.
9. Каушила К. А. К вопросу о территориальном распределении и годовом ходе различий минимальной температуры воздуха, обусловленных рельефом // Труды ГГО. 1970. Вып. 264. Микроклиматология. С. 90–96.
10. Peterson T. C. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found // Journal of Climate. 2003. Vol. 16, no. 18. P. 2941–2959.

**Сведения об авторах**

*Демин Валерий Иванович* — научный сотрудник Полярного геофизического института КНЦ РАН

E-mail: demin@pgia.ru;

*Козелов Борис Владимирович* — доктор физико-математических наук, врио директора Полярного геофизического института КНЦ РАН

E-mail: boris.kozelov@gmail.com

*Елизарова Наталья Ивановна* — начальник АМСГ «Апатиты» СЗФ ФГБУ "Авиаметтелеком Росгидромета"

E-mail: apatity@aviamet-szf.ru

*Меньшов Юрий Владимирович* — начальник Территориального ситуационного центра «Федеральное казенное учреждение "Управление автомобильной магистрали Санкт-Петербург – Мурманск Федерального дорожного агентства"»

E-mail: cou@fad.karelia.ru

**Author Affiliation**

*Valery I. Demin* — Researcher of the Polar Geophysical Institute of the KSC of the RAS

E-mail: demin@pgia.ru

*Boris V. Kozelov* — Dr. Sci. (Physics & Math.), Acting Director of the Polar Geophysical Institute of the KSC of the RAS

E-mail: boris.kozelov@gmail.com

*Natalia I. Elizarova* — Head of the CAMS "Apatity", FSBE "Aviamettelecom of Roshydromet", North-Western Branch

E-mail: apatity@aviamet-szf.ru

*Yury V. Menshov* — Head of the Territorial-Situational Center, Uprdor "Kola"

E-mail: cou@fad.karelia.ru

**Библиографическое описание статьи**

Влияние рельефа на микроклиматическую изменчивость зимней температуры воздуха в городе Апатиты / В. И. Демин [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 3 (26). — С. 83–95.

**Reference**

*Demin Valery I., Kozelov Boris V., Elizarova Natalia I., Menshov Yury V.* Topography Influence on Microclimatic Variation of Winter Air Temperature in Apatity Town. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 3 (26), pp. 83–95. (In Russ.).



УДК 579.26/504.3.054(470.21)

## БАКТЕРИАЛЬНЫЙ АЭРОПЛАНКТОН ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ ВОЗДУХА РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗОН В КОЛЬСКОЙ АРКТИКЕ\*

Г. А. Евдокимова, Н. П. Мозгова

ФГБУН Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

### Аннотация

Выполнены исследования численности бактериального аэропланктона приземных слоев воздуха в тундре, подзоне северной тайги и промышленных зонах Евро-Арктического региона. Отбор проб проведен в летне-осенний период автоматическим пробоотборником ПУ1Б на каждом участке в 3 повторностях на высоте 1.2 м. Среди бактериальной биоты в приземном воздухе как тундры, так и тайги доминируют Гр<sup>+</sup> бактерии (отдел *Fermicutes*). Наиболее чист воздух над побережьем Баренцева моря, всего 1–2 клетки в 1 м<sup>3</sup>. Выявлено бактериальное загрязнение воздуха (100–600 КОЕ в 1 м<sup>3</sup>) вблизи промышленных предприятий (до 3 км) с доминированием Гр<sup>-</sup> бактерий (отдел *Gracilicutes*), обладающих большей устойчивостью к неблагоприятным факторам благодаря наличию более мощной и слабо проницаемой клеточной стенки по сравнению с Гр<sup>+</sup> неспорообразующими бактериями.

### Ключевые слова:

*бактериальный аэропланктон, воздушная среда, тундра, тайга, промышленная зона.*

## BACTERIAL AEROPLANKTON IN THE SURFACE LAYERS AIR FROM DIFFERENT NATURAL AND INDUSTRIAL ZONES OF THE KOLA ARCTIC

Galina A. Evdokimova, Natalya P. Mozgova

*Institute of the Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Center RAS*

### Abstract

A number of fungi and bacterial aeroplankton in surface air of Euro-Arctic areas (i. e. in tundra zone, Northern taiga subzone and industrial zones) have been studied. Sampling was carried out in summer-autumn period by automated sampler PU1B at three points for each sampling site at the height of 1.2 m. Gram-positive bacteria (division *Fermicutes*) dominate among the bacterial biota in the surface air of both tundra and taiga. The cleanest air was found above the Barents Sea coast (only in 1-2 cells per 1 m<sup>3</sup>). Bacterial pollution is registered in the vicinity of industrial centers (100–600 cells per 1 m<sup>3</sup>). In the polluted air near the copper-nickel smelters, gram-negative bacteria (division *Gracilicutes*) dominate because they have more resistant cell walls compared to gram-positive bacteria.

### Keywords:

*bacterial aeroplankton, air environment, tundra, taiga, industrial zone.*



### Введение

Человек от первого вдоха при рождении в течение всей своей жизни находится в воздушной атмосфере. С воздухом он соприкасается раньше, чем с другими природными средами — водой и почвой. От состава воздуха, от содержащихся в нем химических и биологических примесей зависит качество жизни человека.

Атмосферный воздух не является благоприятной

---

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Живая природа: современное состояние и проблемы развития».

средой для развития микроорганизмов по ряду причин: нехватка питательных элементов, сухость и высокая температура в определенные периоды, ультрафиолетовое облучение. Однако бактериальные споры длительный период времени могут находиться и сохранять свою жизнеспособность в воздушной среде, особенно на частицах пыли.

Основные источники загрязнения воздуха микроорганизмами — это почва и растительность. Количественный и качественный состав микробиоты атмосферного воздуха зависит от климатических и метеорологических условий, сезона года, близости промышленных предприятий и других факторов. Количество микроорганизмов в воздухе может колебаться в широких пределах и достигать десятков тысяч в  $1 \text{ м}^3$ . Летом ветер, поднимая с земли пыль, отягощает приземный воздух бактериями, содержание которых в воздухе уменьшается в дождливый период времени как в результате седиментации частиц пыли и отдельных спор, так и в силу снижения поступления в воздух микробов с влажных почв и растений [1].

Наиболее загрязнен микробиотой воздух крупных промышленных городов [2–8]. Особенно повышено количество бактерий и грибов в воздухе вблизи городских автомагистралей [9].

**Цель данного исследования** состояла в получении новых знаний о численности бактериального аэропланктона приземных слоев воздуха в высоких широтах в фоновых и промышленных регионах.

### Объекты и методы

Пробы воздуха отбирали и анализировали в нескольких аспектах — микробиота воздушной среды тундры, подзоны северной тайги и промышленных зон. Отбор проб проведен в летне-осенний период автоматическим пробоотборником ПУ1Б с принудительным осаждением бактерий из воздуха на поверхность мясо-пептонного агара (рис. 1). В зависимости от предполагаемой степени загрязнения пропускали от 250 до 350 л воздуха на высоте 1.2 м в трех повторностях на каждом участке. Отбор проб проводили в сухую погоду.



Рис. 1. Отбор проб воздуха автоматическим пробоотборником ПУ1Б на п-ове Рыбачий

Климатические показатели влияют на формирование не только растительного и почвенного покровов, но и на состав приземного воздуха, в том числе его бактериальной составляющей. Средние климатические показатели по Мурманской обл. за последнее десятилетие представлены в табл. 1. В целом климат Кольского п-ова можно охарактеризовать как субарктический морской, имеющий многие черты континентального климата. Он определяется географическим положением Кольского п-ова за полярным кругом между Европейским материком с юга и Арктическим

бассейном с севера, а также близостью теплого сектора Атлантики. Значительное влияние на климат оказывает проходящее у северных берегов теплое Нордкапское течение в Баренцевом море. В связи с этим в холодный период времени температура воздуха в тундре выше, чем в подзоне северной тайги. В теплый период — период вегетации растений, воздух в подзоне северной тайги прогревается больше, чем в тундре, где ветер сильнее.

Таблица 1

Средние климатические показатели природных зон Мурманской области  
(за период с 01.02.2006 по 01.02.2016 гг.)\*

Климатические показатели	Зона тундры	Подзона северной тайги
Количество дней с температурой выше 5 °С**	112–128	126–142
Сумма положительных температур за вегетационный период (май — сентябрь), °С**	1133	1559
Средняя температура, °С**		
годовая	0.5 – 2.6	-0.3–1.8
январь	-11.6 – -4.9	-13.9 – -8.2
июль	9.5 – 11.4	12.9 – 14.6
теплый период (май — сентябрь)	7.6 – 8.8	9.3 – 10.7
холодный период (октябрь — апрель)	-4.9 – -1.6	-7.1 – -3.8
Сумма осадков, мм/год	354 – 463	455 – 574
Скорость ветра, м/с	4.7–7.1	1.3–5.1
Относительная влажность, %	81–84	79–84

\* Источник данных — архив сайта [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru) (составитель — В. А. Мязин по данным 10 метеостанций).

\*\* Учитывалась средняя температура за сутки.

**Характеристика участков.** Полуостров Рыбачий расположен выше 69-й параллели, в зоне тундры, и относится к районам с типично морским муссонным климатом, формирующимся под воздействием Баренцева моря. В целом средняя температура летнего сезона на Мурманском побережье не более +9 °С [10]. Минимальная температура в июне может опускаться до -3 °С при вторжении арктических воздушных масс. Относительная влажность воздуха > 80 %. Часты туманы.

Маршрут по полуострову пролегал от губы Большая Волоковая Баренцева моря на запад к мысу Немецкий. Даты отбора проб — 6–8 июля 2015 г. Температура воздуха в этот период изменялась от +6.4° до +7.9 °С. В табл. 2 приведена характеристика участков отбора проб воздуха в тундровой зоне.

Таблица 2

Характеристика участков на п-ове Рыбачий

№ участка	Координаты, высота над у. м., м	Почва	Растительность
1	69° 49' 17" N 32° 01' 58" E 20 н. у. м.	Подбур	Побережье моря. Воронично-ерниковая тундра
2	69° 49' 31" N 32° 02' 10" E 73 н. у. м.	Подбур	Воронично-ерниковая тундра
3	69° 18' 53" N 32° 03' 13" E 73 н. у. м.	Торфяная	Склон горы. Воронично-ерниковая тундра с обилием хвоща лесного

			<i>Окончание таблицы 2</i>
4	69° 48' 5" N 32° 03' 30" E 100 н. у. м.	Al-Fe- гумусовый подзол	Воронично-ерниковая тундра, очень пятнистая из-за выхода коренных пород
5	69° 48' 55" N 32° 03' 30" E 100 н. у. м.	Криогенная	Криогенное пятно диаметром 70 см, без растительности
6	69° 46' 02" N 32° 06' 03" E 51 н. у. м.	Торфяная	Березовое криволесье с разнотравьем из злаков, герани лесной, дерна шведского, вороники, папоротников, марьянника лесного, бодяка разнолистного
7	69° 46' 03" N 32° 06' 10" E 66 н. у. м.	Подбур	Воронично-лишайниковая тундра
8	69° 45' 59" N 32° 05' 18" E 0 н. у. м.	Примитивная. Каменисто- щебнистый субстрат в приливно- отливной зоне	Прибрежная полоса лебеды голостебельной ( <i>Atriplex nudicalis</i> Bogusl.)
9	69° 44' 17" N 32° 10' 44" E 116 н. у. м.	Al-Fe- гумусовый подзол	Равнинная воронично-лишайниковая тундра
10	69° 44' 16" N 32° 11' 15" E 107 н. у. м.	Болотная	Болото. Растительность: пушица, осоки, ива травянистая
11	69° 44' 39" N 32° 05' 25" E 15 н. у. м.	Торфяная	Равнинная воронично-зеленомошная тундра с примесью морошки, жирянки обыкновенной, подбела многолистного

Другие территории обследования включали в себя площадки, расположенные в подзоне северной тайги в государственном заповеднике «Пасвик» и в районах, загрязняемых выбросами промышленных предприятий: в зонах воздействия газоздушных выбросов медно-никелевого комбината Печенганикель» (SO<sub>2</sub>, тяжелые металлы) и Кандалакшского алюминиевого завода – КАЗ (F, Al, ПАУ) (табл.3). Сроки отбора проб в зоне воздействия комбината «Печенганикель» и в заповеднике — 19–21 июня 2012 и 2014 гг. Температура воздуха в периоды отбора проб изменялась от 6.3 до 16.0 °С. В зоне воздействия Кандалакшского алюминиевого завода отбор проб воздуха проводили 10 июня 2012 и 2015 гг. (при температуре 6.4–15.4 °С) и 11 сентября 2012, 2013 и 2014 гг. (при температуре 9.2–17.0 °С), в каждый срок по 3 повторности.

Характеристика участков в зонах воздействия комбината «Печенганикель»,  
Кандалакшского алюминиевого завода и в заповеднике «Пасвик»

Расстояние от источника загрязнения, км	Координаты	Растительность
Комбинат «Печенганикель»		
1	N 69°24'25" E 30°13'04"	Город, ивняк с куртинками хвоща
2	N 69°24'27" E 30°11'25"	Березняк с редкими пятнами хвоща
3	N 69°23'44" E 30°10'42"	Сосняк брусничный с примесью березы
5	N 69°23'33" E 30°06'05"	Сосняк воронично-брусничный
8	N 69°24'35" E 29°58'21"	Сосняк кустарничковый
10	N 69°23'51" E 29°56'12"	Болото, луговина
13	N 69°23'09" E 29°56'12"	Сосняк кустарничковый с примесью березы
16	N 69°21'44" E 29°32'31"	Сосняк кустарничковый с примесью березы
20	N 69°21'46" E 29°45'11"	Сосняк старовозрастный с примесью березы
25	N 69°19'11" E 29°40'20"	Сосняк брусничный
30	N 69°17'18" E 29°27'44"	Сосняк вороничный
КАЗ		
0.5	N 67°11'17" E 32°25'03"	Сосняк брусничный с примесью берез
2	N 67°12'82" E 32°25'58"	Сосняк вороничный
5	N 67°14'72" E 32°24'79"	Сосняк брусничный сфагновый
8	N 67°15'16" E 32°25'47"	Сосняк брусничный сфагновый
15	N 67°18'43" E 32°29'07"	Сосняк брусничный сфагновый
50*	N 67°33'54" E 32°10'91"	Сосняк чернично-сфагновый
Заповедник «Пасвик»		
40*	N 69°13'36" E 29°21'31"	Сосняк вторичный кустарничково-зеленомошный
50*	N 69°07'56" E 69°07'56"	Сосняк кустарничково-лишайниковый

\* Фоновые участки в подзоне северной тайги.

Зоны максимального загрязнения находятся до 2 км от КАЗ и 3 км от комбината «Печенганикель». Зоны среднего загрязнения — до 8 км от КАЗ и 16 км от комбината «Печенганикель» и умеренного загрязнения — до 15 и 30 км соответственно.

## Результаты и обсуждение

### Зона тундры, п-ов Рыбачий

Воздух над ландшафтами п-ва Рыбачий относительно чист по микробиологическим показателям (табл. 4). Наиболее чистый воздух над побережьем Баренцева моря, всего 1–2 клетки в 1 м<sup>3</sup> (площадка № 8).

Среди бактериальной биоты в воздухе доминируют Гр<sup>+</sup> бактерии (отдел *Fermicutes*). Их доля составляет 90–99 % от общего числа бактерий в воздухе. В воздушном пространстве, подверженном в полярный день воздействию круглосуточного ультрафиолетового облучения, они находятся в основном в виде эндоспор, что позволяет этим бактериям длительно сохраняться в неблагоприятных условиях.

Над большинством наземных ландшафтов полуострова число грибных колониобразующих единиц (КОЕ) в приземном воздухе преобладает над числом бактериальных КОЕ [11]. Особенно хорошо это прослеживается над участками с обильным растительным покровом, например над болотной почвой (разрез 10).

Таблица 4

Численность бактерий (КОЕ/м<sup>3</sup>) в воздухе п-ова Рыбачий

№ участка	Бактерии
1	230 ± 54
2	75 ± 27
3	40 ± 16
4	36 ± 17
7	34 ± 26
8	1.4 ± 1
9	15 ± 8
10	27 ± 3

### Загрязненные участки в зоне воздействия комбината «Печенганикель»

Полученные данные свидетельствуют о бактериальном загрязнении воздуха вблизи промышленных центров, чему немало способствует почва этих территорий, эродированная и не имеющая наземной растительности (табл. 5).

Таблица 5

Численность бактерий (КОЕ/м<sup>3</sup>) в воздухе по градиенту загрязнения выбросами комбината «Печенганикель»

Расстояние от источника загрязнения, км	Бактерии	Расстояние от источника загрязнения, км	Бактерии
1	388 ± 42	16	6 ± 1
2	113 ± 48	20	47 ± 18
3	612 ± 71	25	8 ± 0
5	40 ± 5	30	11 ± 3
8	20 ± 11	40*	16 ± 0
10	208 ± 0	50*	12 ± 0
13	Не обн.		

\* Чистые участки в заповеднике «Пасвик» (подзона северной тайги).

Численность бактерий в воздухе зоны максимального загрязнения, в пределах 3 км от комбината, составила 100–600 КОЕ в 1 м<sup>3</sup>. По мере удаления от города число бактериальных клеток в воздухе снизилось до 8–40 КОЕ/м<sup>3</sup>, что свидетельствует о бактериологической чистоте воздуха в лесных экосистемах (рис. 2).

В воздухе вблизи комбината доминируют Гр<sup>-</sup> бактерии (отдел *Gracilicutes*). Из-за своей более мощной и плохо проницаемой клеточной стенки грамотрицательные бактерии устойчивее грамположительных не только к антибиотикам, но и к воздействию тяжелых металлов [12]. Можно предположить, что их устойчивость сохраняется и к загрязняющим соединениям, содержащимся в воздухе промышленных центров. В воздухе над удаленными чистыми участками Гр<sup>-</sup> бактерии, за редким исключением, не выявлены, здесь доминируют Гр<sup>+</sup> бактерии, как и в воздушной среде п-ва Рыбачий. Преобладают среди этой группы бактерий споровые пигментные формы, устойчивые к высушиванию и солнечной радиации. Доминирование пигментообразующих бактерий в воздухе было отмечено и в работе Ахмедовой и Джафаровой [13].

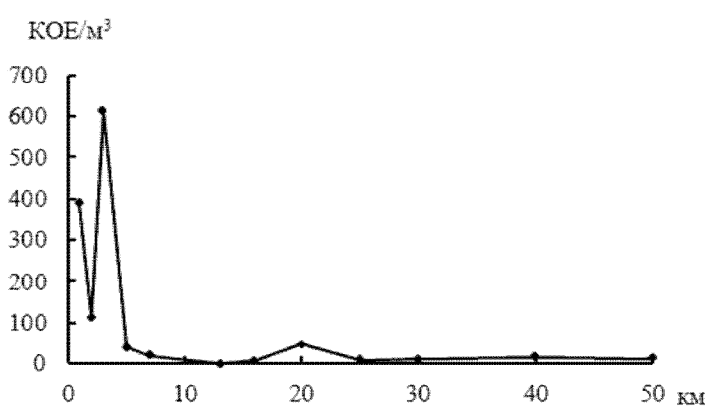


Рис. 2. Распределение числа бактерий (КОЕ/м<sup>3</sup>) в воздухе по градиенту загрязнения выбросами комбината «Печенганикель».

### Загрязненные участки в зоне воздействия КАЗ

В зоне воздействия газозадушных выбросов КАЗ численность микробиоты в воздухе определяли в июне и сентябре. Количество бактерий в зоне максимального загрязнения выше, чем над удаленными участками, и достигает 300–400 КОЕ в 1 м<sup>3</sup> (табл. 6).

Таблица 6

Численность бактерий в воздухе (КОЕ/м<sup>3</sup>) по градиенту загрязнения выбросами КАЗ

Расстояние от источника загрязнения, км	Температура воздуха (июнь/сентябрь), °С	КОЕ/м <sup>3</sup>		
		июнь	сентябрь	среднее
0.5	14.4/10.2	308±50	425±93	367±71
2	13.4/9.8	67±30	101±10	84±20
5	14.5/9.8	43±17	36±14	39±15
10	14.6/10.4	29±14	51±13	40±14
20	15.4/10.2	36±4	33±8	35±6
50	12.4/9.2	41±10	7±6	24±8

По мере удаления от завода число бактерий в воздухе уменьшилось на порядок (30–50 КОЕ в 1 м<sup>3</sup>). Несмотря на снижение температуры в сентябре, численность бактерий в воздухе

на ближних к заводу участках не снизилась и даже превосходила их число в летний период. Возможно, существенное влияние на число бактерий в приземных слоях воздуха оказали участвовавшие в осенний период порывы ветра и занос бактерий с эродированных урбанизированных территорий.

Таким образом, получены новые сведения о численности бактериального аэропланктона приземных слоев воздуха в высоких широтах в природных и техногенных условиях. В воздухе чистых регионов, как в тундре, так и в тайге, среди бактериальной биоты доминируют  $Gr^+$  бактерии (отдел *Fermicutes*). Выявлено бактериальное загрязнение воздуха (100–600 КОЕ в  $1\text{ м}^3$ ) вблизи промышленных предприятий (до 3 км), чему немало способствует почва этих территорий, эродированная и без наземной растительности. Здесь доминировали  $Gr^-$  бактерии (отдел *Gracilicutes*), обладающие высокой устойчивостью к неблагоприятным факторам.

### Благодарности

Авторы благодарят сотрудников лаборатории экологии микроорганизмов к. б. н. М. В. Корнейкову за помощь в отборе проб воздуха и к. б. н. В. А. Мязина за сбор и обобщение климатических показателей по Мурманской обл.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Влодавец В. В. Микрофлора атмосферного воздуха // Роль микроорганизмов в круговороте газов в природе. М.: Наука, 1979. С. 50–65.
2. Микроскопические грибы в воздушной среде Санкт-Петербурга / Е. В. Богомолова [и др.]; под ред. М. А. Бондарцевой. СПб.: Химиздат, 2012. 215 с.
3. Колосова Е. Д., Марфенина О. Е. Грибные споры в приземных слоях воздуха (сезонная и суточная динамика, размерный состав, влияние метеофакторов) на примере ЮЗАО г. Москвы // Современная микология в России: материалы III Международного микологического форума (Москва, 14–15 апреля 2015 г.) / под ред. Ю. Т. Дьякова, Ю. В. Сергеева. М.: Нац. акад. Микол., 2015. Т. 4. С. 196–198.
4. Иванова А. М., Курцидели И. Ю. Микромицеты в воздушном бассейне Санкт-Петербурга // Новости систематики низших растений. 2005. Т. 39. С. 124–128.
5. Марфенина О. Е., Макарова Н. В., Иванова А. Е. Оппортунистические грибы в почвах и приземных слоях воздуха мегаполиса (на примере района Тушино г. Москвы) // Микология и фитопатология. 2011. Т. 45, вып. 5. С. 397–407.
6. Абросимова О. В., Гудкова М. А. Оценка численности микроорганизмов в приземном слое воздуха и снеговом покрове промышленных районов г. Саратова // Экологические проблемы промышленных городов: сб. науч. тр. Саратов, 2009. С. 3–5.
7. Diurnal distribution of airborne bacteria and fungi in the atmosphere of Helwan area, Egypt / A. A. Abdul Hameed [et al.] // Sci. Total Environ. 2009. 407 (24). P. 6217–6222.
8. Микроорганизмы воздушной среды обитания по градиенту загрязнения от комбината «Печенганикель» к заповеднику «ПАСВИК» / Г. А. Евдокимова [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 3(10). С. 22–25.
9. Кузнецова А. В., Владимцева И. В. Микробиологический мониторинг атмосферного воздуха // Вестник ВолГУ. Волгоград, 2011. № 2. С. 267–270.
10. Яковлев Б. А. Климат Мурманской области. Мурманск: Книжное изд-во, 1961. 183 с.
11. Корнейкова М. В., Лебедева Е. В. Микобиота приземного воздуха различных природных зон в Кольской Арктике // Микология и фитопатология. 2013. № 7. С. 30–33.
12. Бузалева Л. С., Кривошеева А. М. Влияние тяжелых металлов на размножение патогенных грибов // Успехи современного естествознания. 2013. № 7. С. 30–33.
13. Ахмедова Ф. Р., Джафарова У. Д. Изучение распространения пигментообразующих бактерий в различных субстратах // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2012. Вып. 12. С. 26–29.

### Сведения об авторах

Евдокимова Галина Андреевна — доктор биологических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, заведующий лабораторией экологии микроорганизмов

E-mail: galina@inep.ksc.ru

Мозгова Наталья Петровна — старший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

E-mail: mozgova@inep.ksc.ru

### Author Affiliation

Galina A. Evdokimova — Dr. Sci. (Biol.), Professor, Vice Director on Science of the Institute of the Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Center RAS, Head of Laboratory on Microorganisms Ecology

E-mail: galina@inep.ksc.ru

Natalya P. Mozgova — Senior Researcher of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC of the RAS

E-mail: mozgova@inep.ksc.ru



**Библиографическое описание статьи**

*Евдокимова, Г. А. Бактериальный аэропланктон приземного слоя воздуха различных природных и промышленных зон в Кольской Арктике / Г. А. Евдокимова, Н. П. Мозгова // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 3 (26). — С. 96–104.*

**Reference**

*Evdokimova Galina A., Mozgova Natalya P. Bacterial Aeroplankton in the Surface Layers Air from Different Natural and Industrial Zones of the Kola Arctic. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2016, vol. 3 (26), pp. 96–104. (In Russ.).*

УДК 504.06:574.24

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ РАСТВОРОВ НИКЕЛЯ ДЛЯ ВОДНЫХ И НАЗЕМНЫХ ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ В ПРИСУТСТВИИ МАГНИЯ\*

Н. М. Калинин<sup>1</sup>, Д. А. Петрашова<sup>2</sup>, С. В. Дрогобужская<sup>3</sup>, И. А. Мосендз<sup>3</sup>,  
И. П. Кременецкая<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН

<sup>3</sup>ФГБУН Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН

### Аннотация

Представлены результаты токсикологической оценки вклада магния в снижение токсичности никеля, который является главным токсикантом импактных зон медно-никелевых предприятий. На водных беспозвоночных и наземных высших растениях показано снижение токсичности невысоких концентраций ионов никеля в присутствии магния в концентрациях от 50 до 300 мг/л.

### Ключевые слова:

*никель, сульфат магния, токсичность, средняя смертельная концентрация, водные беспозвоночные, всхожесть, интенсивность роста, цитостатичность.*

## EVALUATION OF CHANGES OF NICKEL SOLUTION TOXICITY FOR AQUATIC AND SURFACE TEST-OBJECTS IN THE PRESENCE OF MAGNESIUM

Natalia M. Kalinkina<sup>1</sup>, Dina A. Petrashova<sup>2</sup>, Svetlana V. Drogobuzhskaya<sup>3</sup>, Irina A. Mosendz<sup>3</sup>, Irina P. Kremenetskaya<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Northern Water Problems of the Karelian Research Centre of the RAS

<sup>2</sup>R & D Centre for Human Adaptation in the Arctic of the KSC of the RAS

<sup>3</sup>I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of the KSC of the RAS

### Abstract

The estimates of toxicological magnesium contribution into the reduction of nickel toxicity are presented. Nickel is the major toxicant in the impact zones of copper and nickel plants. The decrease of toxicity of low nickel ion concentrations in the presence of magnesium with concentration 50–300 mg/l have been showed for aquatic invertebrates and surface high plants.

### Keywords:

*nickel, magnesium sulfate, toxicity, median lethal concentration, aquatic invertebrates, germination, growth speed, cytostasis.*

### Введение

Кольский п-ов представляет собой промышленно-развитый регион, что, в свою очередь, определяет повышенную техногенную нагрузку на окружающую среду и человека. Так, в окрестностях площадки Мончегорск АО «Кольская ГМК» (ранее комбинат «Североникель», г. Мончегорск, Мурманская обл.) за годы работы (с 1938 г. по настоящее время) сформировались сильно загрязненные зоны, в почвах которых отмечаются высокие концентрации никеля (до 1700–2600 мг/кг), меди (до 600–1000 мг/кг), соединений серы и других

---

\* Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации».

компонентов выбросов [1–4]. Мончегорская пустошь, достигая площади в 200 км<sup>2</sup>, является частью территории водосбора р. Ньюдай, которая впадает в водоем высшей рыбохозяйственной категории — оз. Имандра. Концентрация меди и никеля в водных источниках, расположенных на данной территории, достигает величин порядка 0.5–1 мг/л. Высокие уровни токсичных веществ в почвах и водоемах техногенной пустоши определяют актуальность поиска способов снижения загрязнения тяжелыми металлами ландшафтов, подверженных антропогенному влиянию.

На протяжении ряда лет в Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук (ИХТРЭМС КНЦ РАН) выполняются исследования, направленные на разработку технологии получения и применения магнезиально-силикатного реагента из серпентиновых минералов для иммобилизации тяжелых металлов [5]. В состав реагента в качестве основных компонентов входят оксиды магния и кремния, образующие активную метастабильную фазу в результате термоактивации серпентина. При взаимодействии реагента с растворами тяжелых металлов происходит частичное выщелачивание как MgO, так и SiO<sub>2</sub> с последующим осаждением малорастворимых соединений. Характеристики растворов после очистки реагентом — значения pH и остаточных концентраций — близки к нормативным показателям для рыбохозяйственных водоемов (pH 6.5–8.5; C(Ni) = 0.01 мг/л). Таким образом, химические свойства реагента позволяют использовать его для реабилитации водных источников. В то же время следует определить, какое влияние оказывает присутствие реагента в водной системе на жизнедеятельность биологических объектов.

Целью настоящей работы является проведение токсикологической оценки вклада магнезиального компонента реагента на основе серпентиновых минералов в снижение токсичности растворов, содержащих ионы никеля, который является главным токсикантом в импактной зоне комбината по производству никеля.

### Материалы и методика исследований

Исследования токсичности никеля, магния, а также их совместного влияния на живые организмы проводились на водных беспозвоночных и высших растениях и состояли из нескольких этапов.

На первом этапе был выполнен тест на токсичность водных растворов для гидробионтов с использованием ветвистоусых рачков вида *Ceriodaphnia affinis* Lillijeborg. Данный тест является экспрессным и информативным методом оценки токсичности сточных вод и их компонентов [6–8]. В Институте биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина Российской академии наук (ИБВВ РАН) он адаптирован для целей экологического контроля состояния водных объектов в России [9–11].

Исследования острой и хронической токсичности сульфата никеля и сульфата магния проводились по табличному методу В. Б. Прозоровского и М. П. Прозоровской [12]. В хронических опытах изучалось влияние никеля в концентрациях 0.1, 0.05, 0.01, 0.005 и 0.001 мг/л на выживаемость цериодафний. Контрольной средой служила грунтовая вода, отобранная из источника на территории г. Петрозаводска. Ее химический состав удовлетворяет требованиям, предъявляемым к контрольным средам [11]. Ионный состав воды (мг/л): Na<sup>+</sup> — 7–19; K<sup>+</sup> — 2–4; Ca<sup>2+</sup> — 12–24; Mg<sup>2+</sup> — 4–11; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> — 31–58; Cl<sup>-</sup> — 8–21; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> — 15–40; NO<sub>3</sub><sup>-</sup> — 4–28; pH — 6.2–6.7 [13]. Кормление цериодафний осуществлялось одноклеточными зелеными водорослями *Scenedesmus quadricauda* только в хронических экспериментах продолжительностью до 14 дней. Всего выполнено 13 серий экспериментов, в которых использовано 580 экземпляров цериодафний.

На втором этапе проведен краткосрочный скрининг-тест на растительных объектах — луке репчатом (*Allium cepa* L.) и огурце обыкновенном (*Cucumis sativus* L.). Корень растений обладает рядом преимуществ как тест-объект, поскольку основная часть поступающих в растение веществ поглощается через корневую систему. Кроме того, из-за высокой чувствительности к большинству токсикантов и сравнительно высокой скорости роста [14–17] в корне можно

наблюдать первичные негативные реакции растения. Изменение роста корня довольно легко фиксировать, что делает работу с ним достаточно удобной.

Следует отметить, что оценка замедления прорастания семян и роста проростков, особенно корней, является одним из широко применяемых биотестов, который стандартизирован Американским и Европейским агентствами по контролю окружающей среды [18]. Организация роста корня на клеточном уровне позволяет использовать его как простой и информативный тест для решения важных задач экологического мониторинга [19]. Всхожесть и изменение длины корней у лука отражают токсичность изучаемого фактора. Данный тест можно применять в широком диапазоне значений  $\text{pH} = 3.5\text{--}11$ , в пределах которого не наблюдается каких-либо эффектов на росте корневой системы *A. cepa* [20]. Наблюдение за подавлением образования боковых корней у проростков огурца служит хорошим тестом для определения цитостатичности соединений благодаря тому, что у огурца, как и других тыквенных, боковые корни закладываются в меристеме и при прорастании появляются уже на третий день [21].

Концентрация никеля в исследуемых растворах составляла 0.5 и 1.0 мг/л, концентрация магния — 0, 5, 50, 100 и 300 мг/л. Растворы готовились с использованием реактивов — кристаллогидратов никеля и магния квалификации хч. В качестве контрольного раствора брали дистиллированную воду. Семена *A. cepa* и *S. sativus* помещали в чашки Петри на влажную фильтровальную бумагу по 50 и 30 штук соответственно в трех повторностях на каждую концентрацию раствора. Инкубация происходила при стабильной температуре 20–22 °С. Ежедневно семена проверяли на прорастание. После завершения инкубации семян лука и определения всхожести в течение 10 дней корни фиксировали в уксусном спирте для проведения в дальнейшем ана-телофазного теста. Измерение длины корня и подсчет количества боковых корней огурца проводили на четвертый день после прорастания семян. Всего анализу подвергалось не менее 20 проростков огурца из каждой чашки Петри.

## Результаты и обсуждения

### Токсичность для гидробионтов

Выживаемость рачков в контрольных средах во всех сериях экспериментов была стопроцентной. В экспериментах с *C. affinis* установлены средние смертельные концентрации ( $\text{CL}_{50}$ ), которые для ионов никеля составили величину порядка 0.5 мг/л, для ионов магния — 550–650 мг/л. Согласно классификации Л. А. Лесникова и К. К. Врочинского [22], никель можно отнести к высокотоксичным, а магний — к очень малотоксичным веществам.

Полученные показатели острой токсичности ионов никеля и магния были использованы для изучения их комбинированного воздействия на рачков в краткосрочных экспериментах при экспозиции в 1 сутки.

Острые опыты показали, что токсичность никеля в концентрации 1 мг/л снижалась при добавке магния в концентрациях 50–300 мг/л. Если средняя смертность рачков в чистом растворе никеля при концентрации 1 мг/л составила 45 %, то при добавлении магния снизилась до 10–20 % (концентрация Mg — 50–300 мг/л). Токсичность никеля в концентрации 0.5 мг/л снижалась при добавке магния в концентрациях 5–100 мг/л (рис. 1).

Поскольку одна из задач данных исследований — токсикологическое обоснование применения магниально-силикатного реагента для реабилитации водных объектов, возникла необходимость оценки длительного воздействия компонентов водной среды на биологические объекты. Соответствующие опыты проведены с использованием растворов с концентрацией никеля в диапазоне от 0.1 до 0.01 мг/л, что соответствует снижению относительно  $\text{CL}_{50}$  в 5 и 50 раз.

В хронических опытах полная гибель *C. affinis* в растворах никеля с концентрациями 0.1; 0.05 и 0.01 мг/л наступала на 4, 5 и 14-е сутки соответственно (рис. 2). Полученные данные подтверждают способность никеля накапливаться в организмах при малых уровнях содержания в водной среде [23], что свидетельствует о его высокой опасности для гидробионтов. Именно эта особенность никеля приводила к полной гибели рачков в широком диапазоне весьма малых концентраций (0.5–0.01 мг/л). Примечателен тот факт, что абсолютно смертельной оказалась

концентрация никеля 0.01 мг/л, которая принята в настоящее время за предельно допустимую концентрацию никеля в воде рыбохозяйственных водоемов [24]. Растворы с концентрацией никеля 0.005 мг/л вызвали гибель 33 % рачков на 9-е сутки опыта. Растворы с концентрацией никеля 0.001 мг/л оказались нетоксичными для рачков при экспозиции 9 суток.

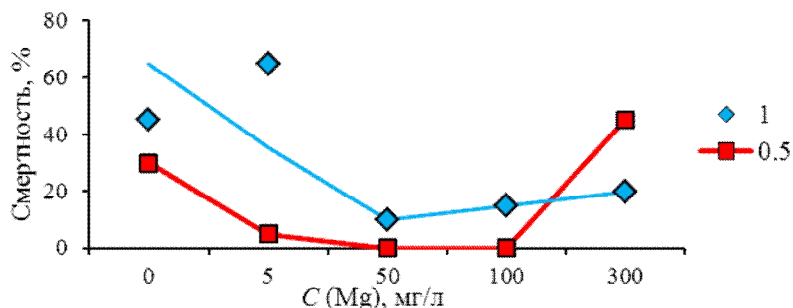


Рис. 1. Зависимость смертности *C. affinis* от концентрации никеля (мг/л, см. легенда) и магния в растворе

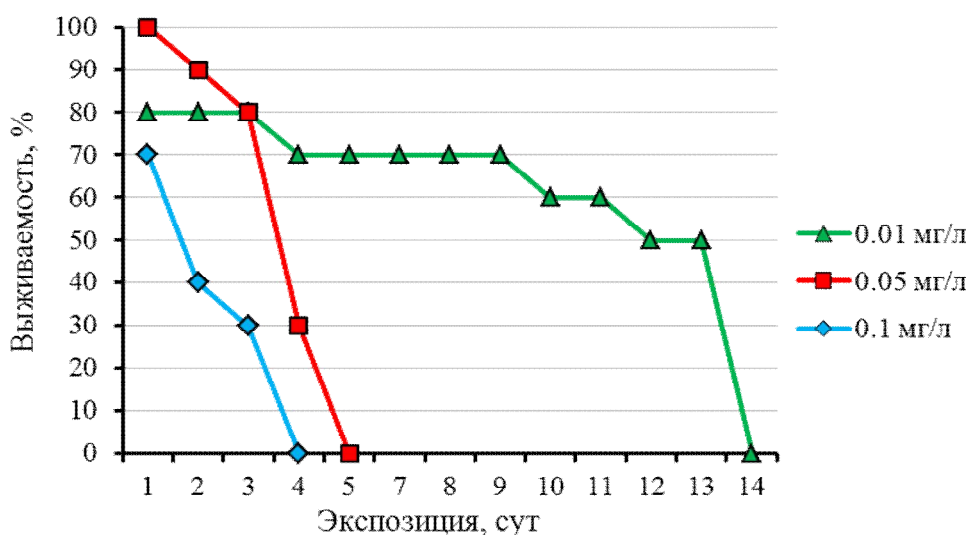


Рис. 2. Выживаемость *C. affinis* в растворах с различной концентрацией никеля

Приведенные выше результаты позволили определить условия проведения хронических опытов по изучению комбинированного действия магния и никеля. Исследованы растворы никеля (концентрация 0.05 мг/л), магния (100 мг/л), а также раствор, содержащий и никель, и магний в тех же концентрациях, экспозиция — 9 суток. Обнаружено, что при выбранной продолжительности опыта в растворе сульфата магния (100 мг/л Mg) все рачки остались жизнеспособны, в то время как в растворе сульфата никеля (0.05 мг/л Ni) они полностью погибли на 7-е сутки.

При изучении комбинированного действия оказалось, что выживаемость цериодафний на 7-е сутки в смеси никеля и магния составила 93 %, на 8-е сутки — 47 %, а на 9-е сутки — 27 %. При добавке магния плодовитость цериодафний, выживших в растворе никеля, составила 2 экз/самку (при контрольных показателях 4 экз/самку). Следовательно, добавление магния в концентрации 100 мг/л к раствору никеля в концентрации 0.05 мг/л снижает его токсичность: добавка магния не только приводит к частичному выживанию рачков, но и способствует сохранению у них функции размножения.

В пределах техногенного ландшафта импактной зоны медно-никелевого производства, помимо водных источников, в реабилитации нуждаются и почвенные объекты. Предложен способ восстановления растительного покрова путем создания искусственных фитоценозов с применением отходов, содержащих карбонаты и/или силикаты кальция и магния [25]. Установлено, что с течением времени в условиях действующего производства происходит накопление экотоксикантов в слое минерального субстрата. Один из аспектов проведения рекультивационных работ заключается в выявлении ограничений по содержанию тяжелых металлов и макрокомпонентов — кальция и магния, при которых будут сохраняться условия, приемлемые для произрастания растений. В настоящей работе представлены результаты применения растительных тест-объектов для оценки влияния магния на токсичность никеля. В экспериментах использованы те же растворы, что и при исследовании острой токсичности комбинированных растворов при воздействии на периодафний (рис. 1).

Анализ всхожести семян лука показал, что никель при концентрации 0.5–1.0 мг/л оказывает стимулирующее, а не подавляющее действие (рис. 3). Полученные результаты соответствуют литературным данным, согласно которым никель входит в число важных микроэлементов как компонент уреаз и различных дегидрогеназ и необходим для бактерий и высших растений. В последних наиболее хорошо изучен никельсодержащий фермент уреазы, который принимает участие в трансформации мочевины. Он необходим для стабилизации структуры фермента и проявления им каталитических функций. Уреазы в растениях локализованы в вегетативных тканях и семенах [26]. В обеспеченных никелем растениях активность уреазы выше и, соответственно, ниже содержание мочевины по сравнению с растениями, не обеспеченными никелем [27]. Если в среде содержится небольшое количество никеля, прорастание семян многих видов растений усиливается [28].

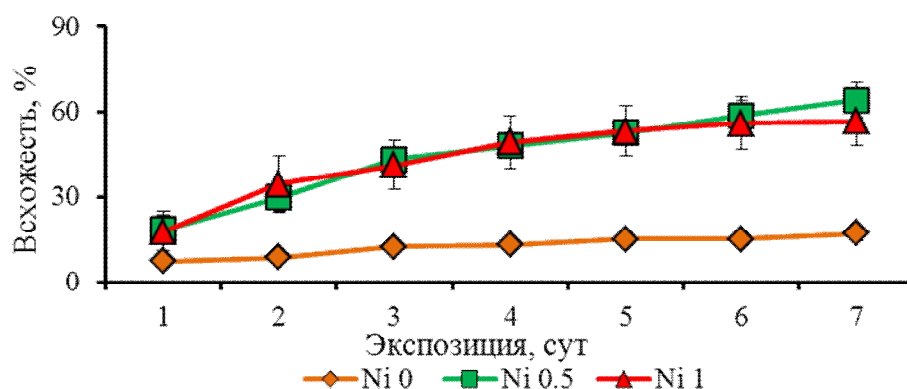


Рис. 3. Зависимость всхожести *A. sepa* от концентрации никеля (мг/л, см. легенда) в растворе

В опытах, результаты которых представлены на рис. 4, фиксировали долю проросших семян *A. sepa*. Установлено, что при добавлении магния с концентрацией 50–300 мг/л уровень всхожести лука становится сопоставимым со значениями, полученными в контрольном опыте.

Тест на цитостатичность на проростках огурца показал, что в растворах, содержащих только никель, рост корней тормозится по сравнению с контрольным опытом, причем при концентрации никеля 1.0 мг/л количество боковых корней снижается, а при концентрации 0.5 мг/л, наоборот, увеличивается (рис. 5).

Согласно литературным данным, основная причина ингибирования образования боковых корней — накопление никеля в протопластах клеток перцикла [15]. Ингибирование образования боковых корней при высоких концентрациях металла отличает токсическое действие Ni от других тяжелых металлов, таких как Ag, Cd, Pb, Zn, Cu, Co и Hg.

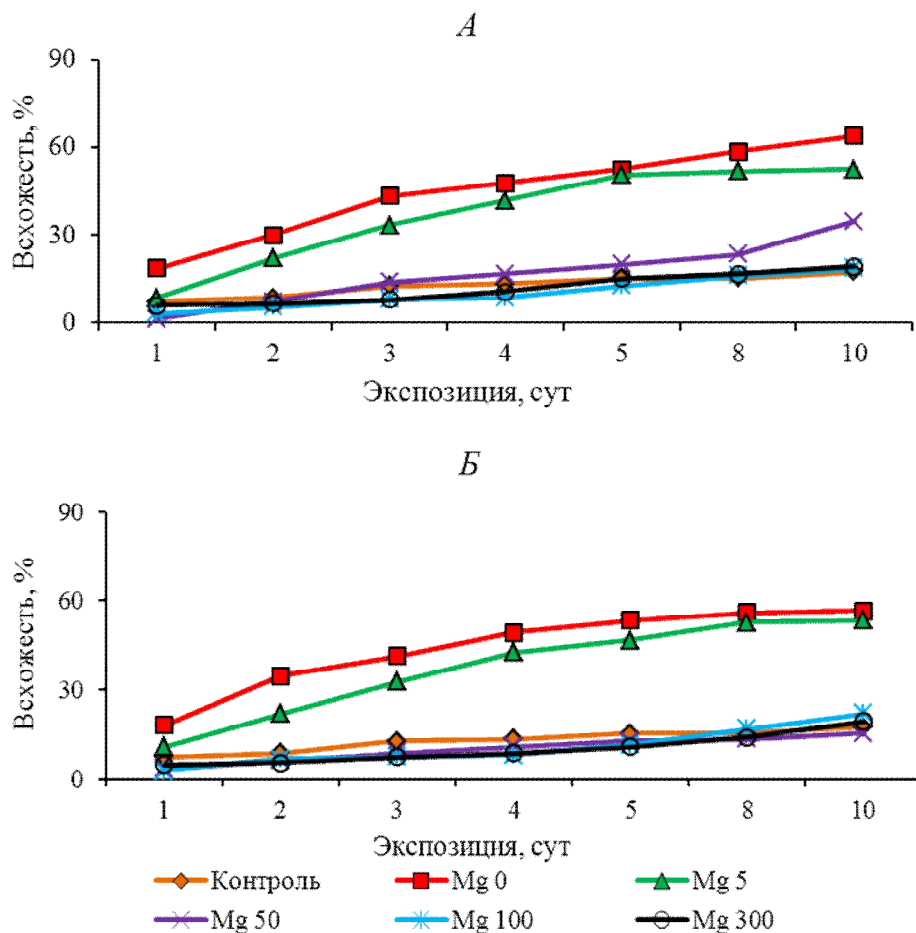


Рис. 4. Зависимость всхожести *A. сера* от концентрации магния в растворе (мг/л, см. легенда) с концентрацией никеля 0.5 мг/л (А) и 1.0 мг/л (Б)

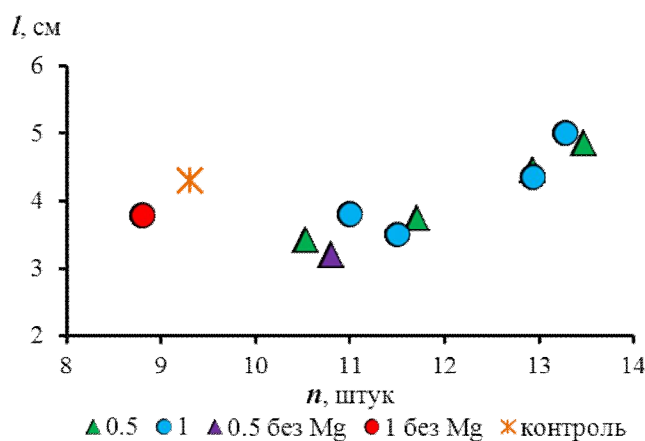


Рис. 5. Диаграмма рассеяния количества боковых корней и длины основного корня *C. sativus* в зависимости от концентрации Ni и Mg в растворе

Следует отметить, что для никеля характерна высокая способность проникновения в растение [29]. В то же время между никелем и магнием имеются биохимические взаимодействия. Так, по литературным данным, ионы никеля оказывают токсическое действие на  $Mg^{2+}$ -зависимые АТФазы плазмолеммы *in vitro* посредством его связывания с сульфгидрильными группами ферментов [30].

Возможно, избыток магния в растворе подавляет данный процесс. Экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, подтвердили наличие биохимических механизмов влияния магния на биологические эффекты никеля. При добавлении в раствор магния зафиксировано снижение цитостатического действия никеля, что выражается в увеличении длины основного корня и количества боковых корней у проростков (рис. 5).

### Заключение, выводы

Проведенные исследования позволили установить весьма высокую токсичность и опасность ионов никеля для вида *Ceriodaphnia affinis*. Величина среднесмертельных концентраций никеля составила порядка 0.5 мг/л, что позволяет отнести никель, согласно классификации Л. А. Лесникова и К. К. Врочинского [22], к высокотоксичным соединениям. Опасность ионов никеля связана с их способностью вызывать быструю (за 14 суток) гибель рачков при концентрации всего 0.01 мг/л, которая в настоящее время принята за ПДК никеля в воде рыбохозяйственных водоемов. Ионы магния, согласно той же классификации, относятся к очень малотоксичным веществам. Острые и хронические комбинированные опыты позволили выявить положительную роль магния, вызывающего снижение токсичности никеля.

Исследование комбинированного действия магния и никеля позволило установить, что между этими элементами существуют слабые антагонистические отношения. На водных беспозвоночных и наземных высших растениях показано снижение биологической эффективности невысоких концентраций ионов никеля в присутствии магния в концентрации от 50 до 300 мг/л. Наблюдается корреляция между откликом различных тест-объектов на токсическое воздействие никеля в присутствии магния.

Задачи будущих исследований состоят в изучении цитогентоксичности совместного воздействия никеля и магния с использованием *Allium*-теста, рекомендованного экспертами Всемирной организации здравоохранения как стандарт в цитогенетическом мониторинге окружающей среды. Результаты, полученные в данном тесте, хорошо коррелируют с результатами тестов на клетках млекопитающих и человека (корреляция до 82 %) [20, 31].

### Благодарности

Авторы выражают благодарность Ирине Васильевне Чаловой, с. н. с. Института биологии внутренних вод РАН им. В. Д. Папанина, за предоставление культуры вида *C. affinis*.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Евдокимова Г. А. Эколого-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. 272 с.
2. Evdokimova G. A. The impact of heavy metals on the microbial diversity of podzolic soils in the Kola Peninsula // UFRO No. 1. Research Series. Forest Dynamics in Heavily Polluted Regions. Task Force on Environmental Change. CAB Publishing, 1999. P. 67–76.
3. Зональные особенности формирования химического состава вод малых озер на территории Европейской части России / Т. И. Моисеенко [и др.] // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 163–180.
4. Ремедиация нарушенных территорий в зоне влияния медно-никелевого производства / Л. Г. Исаева [и др.] // Цветные металлы. 2011. № 11. С. 66–70.
5. Кременецкая И. П., Корытная О. П., Васильева Т. Н. Реагент для иммобилизации тяжелых металлов из серпентинсодержащих вскрышных пород // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2008. № 4. С. 33–40.
6. Чалова И. В. Использование биотеста на *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg в экотоксикологических исследованиях // Физиология и токсикология пресноводных животных. Рыбинск: ОАО «Рыбинский дом печати», 2007. С. 252–268.
7. Чалова И. В., Крылов А. В. Оценка качества природных и сточных вод методами биотестирования с использованием ветвистоусых ракообразных (Cladocera, Crustacea). Научно-методическое издание. Рыбинск: Изд-во ОАО «Рыбинский дом печати», 2007. 73 с.
8. Калинин Н. М. Использование тест-объекта *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg при биотестировании техногенных вод горнорудного производства // Водная среда: обучение для устойчивого развития. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. С. 48–52.
9. Метод биотестирования природных и сточных вод с использованием рачка *Ceriodaphnia affinis* / Б. А. Флеров [и др.] // Методы биотестирования вод. Черноголовка, 1988. С. 111–114.
10. Флеров Б. А., Жмур Н. С. Биотестирование с использованием цериодафний // Методическое руководство по биотестированию воды: РД-118-02-90. М., 1991. С. 1928.
11. Жмур Н. С. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости цериодафний. М.: Акварос, 2001. 52 с.
12. Прозоровский В. Б., Прозоровская М. П. Табличный метод определения ЕД50 (CL<sub>50</sub>) веществ с низкой биологической активностью // Фармакология и токсикология. 1980. № 6. С. 733–735.
13. Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения / ред. Н. Филатова [и др.].



Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 263 с. **14. Серегин И. В., Иванов В. Б.** Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48. С. 606–630. **15. Иванов В. Б., Быстров Е. И., Серегин И. В.** Сравнение влияния тяжелых металлов на рост корня в связи с проблемой специфичности и избирательности их действия // Физиология растений. 2003. Т. 50, № 3. С. 445–454. **16. Кожевникова А. Д.** Распределение никеля в проростках кукурузы и его ингибирующее действие на рост: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: ИФР, 2006. С. 18. **17.** Влияние тяжелых металлов и стронция на деление клеток корневого чехлика и структурную организацию меристемы / А. Д. Кожевникова [и др.] // Физиология растений. 2007. Т. 54. С. 290–299. **18.** Seed germination and root elongation toxicity tests in hazardous waste site evaluation: Methods development and applications / G. Linder [et al.] // U. S. Environmental Protection Agency Corvallis, OR, PB90113184, 1989. **19. Иванов В. Б.** Клеточные механизмы роста растений. М.: Наука, 2011. 104 с. **20. Fiskesjo G.** The Allium test as a standard in environmental monitoring // Hereditas. 1985. Vol. 102. P. 99–112. **21. Иванов В. Б., Быстрова Е. И., Дубровский И. Г.** Проростки огурца как тест-объект для обнаружения эффективных цитостатиков // Физиология растений. 1986. Т. 33. С. 195–199. **22. Лесников Л. А., Врочинский К. К.** Классификация пестицидов с рыбохозяйственных позиций // Изв. ГосНИОРХ. 1974. Вып. 98. С. 9–13. **23. Моисеенко Т. И.** Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 261 с. **24. Грушко Я. М.** Вредные неорганические соединения в промышленных сточных водах. Л.: Химия, 1979. 160 с. **25.** Приемы адаптивных технологий при создании культурфитоценозов в условиях техногенных ландшафтов Субарктики, загрязненных тяжелыми металлами / В. Т. Калинин [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 2. С. 78–88. **26.** Jack bean urease (EC 3.5.1.5). A metalloenzyme. A simple biological role for nickel / N. E. Dixon // J. Am. Chem. Soc. 1975. 97 : 4131–4133. **27. Welch R. M.** The biological significance of nickel // Journal of Plant Nutrition. 1981. 3 : 1–4, 345–356. **28. Mishra D., Kar M.** Nickel in plant growth and metabolism. Bot. Rev. 1974. 40 : 395–452. **29. Кошкин Е. И.** Физиология устойчивости сельскохозяйственных культур: учебник / Е. И. Кошкин. М.: Дрофа, 2010. 638 с. **30.** In vivo and in vitro effects of nickel and cadmium on the plasmalemma ATPase from rice (*Oriza sativa* L.) shoots and roots / R. Ros, A. Morales, J. Segura, I. Picazo // Plant Sci. 1992. Vol. 83. P. 1–6. **31. Barberrio A., Voltolini J. C., Mello M. L. S.** Standardization of bulb and root sample sizes for the Allium test // Ecotoxicology. 2011. Vol. 20. P. 927–935.

### Сведения об авторах

*Калинкина Наталья Михайловна* — доктор биологических наук, заведующий лабораторией гидробиологии Института водных проблем Севера КарНЦ РАН

E-mail: cerioda@mail.ru

*Петрашова Дина Александровна* — кандидат биологических наук, научный сотрудник Научно-исследовательского центра медико-биологических проблем адаптации человека в Арктике КНЦ РАН

E-mail: petrashova@admksk.apatity.ru

*Дрогобужская Светлана Витальевна* — кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории химических и оптических методов анализа Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН

E-mail: drogo\_sv@chemy.kolasc.net.ru

*Мосендз Ирина Александровна* — аспирант, младший научный сотрудник лаборатории минерального сырья и силикатного синтеза Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН

E-mail: mosendz@chemy.kolasc.net.ru

*Кременецкая Ирина Петровна* — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории минерального сырья и силикатного синтеза Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН

E-mail: kremen@chemy.kolasc.net.ru

### Author Affiliation

*Natalia M. Kalinkina* — Dr. Sci. (Biol.), Head of Laboratory of Hydrobiology of the Institute of Northern Water Problems of the Karelian Research Centre of the RAS

E-mail: cerioda@mail.ru

*Dina A. Petrashova* — PhD (Biol.), Researcher of the R&D Centre for Human Adaptation in the Arctic of the KSC of the RAS

E-mail: petrashova@admksk.apatity.ru

*Svetlana V. Drogobuzhskaya* — PhD (Chem.), Senior Researcher of Laboratory of Chemical and Optic Methods of Analysis of the I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of the KSC of the RAS

E-mail: drogo\_sv@chemy.kolasc.net.ru

*Irina A. Mosendz* — Post-graduate Student, Junior Researcher of Laboratory of Mineral Raw Materials and Silicate Synthesis of the I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of the KSC of the RAS

E-mail: mosendz@chemy.kolasc.net.ru

*Irina P. Kremenetskaya* — PhD (Eng.), Senior Researcher of Laboratory of Mineral Raw Materials and Silicate Synthesis of the I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of the KSC of the RAS

E-mail: kremen@chemy.kolasc.net.ru

### **Библиографическое описание статьи**

Оценка изменения токсичности растворов никеля для водных и наземных тест-объектов в присутствии магния / *Н. М. Калинкина [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 3(26). — С. 105–113.

### **Reference**

*Kalinkina Natalia M., Petrashova Dina A., Drogobuzhskaya Svetlana V., Mosendz Irina A., Kremenetskaya Irina P.* Evaluation of Changes of Nickel Solution Toxicity for Aquatic and Surface Test-Objects in the Presence of Magnesium. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 3 (26), pp. 105–113. (In Russ.).

УДК 556.561

## ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОД МЕЗООЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТНЫХ МАССИВОВ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

**И. Л. Калюжный**

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург

### Аннотация

На основании многолетних комплексных гидрометеорологических и гидрохимических исследований мезоолиготрофного болота провинции Финско-Кольской северной тайги и лапландских аапа установлено, что гидрохимический режим основных ионов болотных вод зависит от их гидрометеорологического режима и обусловлен химическим составом грунтовых вод и атмосферных осадков, которые существенно трансформируются под влиянием биологических процессов, происходящих в залежи. Приведены пределы изменений содержаний в болотных водах главных ионов, биогенных элементов и органического вещества. Результаты сравнения средних значений компонентов химического состава вод различных микроландшафтов болота показывают, что их содержания различаются незначительно.

### Ключевые слова:

*гидрохимический режим, химический состав болотных вод, главные ионы, биогенные компоненты, мезоолиготрофное болото.*

## HYDROCHEMICAL REGIME AND CHEMICAL COMPOSITION OF WATER FROM MEZO-OLIGOTROPHIC BOGGY LANDS WITHIN THE KOLA PENINSULA

**Igor L. Kalyuzhny**

State Hydrological Institute, St. Petersburg

### Abstract

On the basis of the long-term hydrometeorological and hydrochemical investigations of a mezo-oligotrophic bog located in the Finnish-Kola province of the Northern taiga and Lapland **aapas**, it has been found that hydrochemical regime of predominant ions within bog water depends on hydrometeorological conditions. This regime is also determined by chemical composition of groundwater and precipitation significantly metamorphosing under effect of biological processes within wetlands. Limits of changes in content within bog water are presented for the following components: predominant ions, biogenic elements and organic matter. Maximal bog water mineralization is observed during the winter period (70–100 mg/dm<sup>3</sup> on the average), in the low-water season its value is about 19–25 mg/dm<sup>3</sup>. Hydrocarbonate ion is noted in the bog water only at pH value more than 5.2. Average long-term content of the dissolved organic matter evaluated by dichromate oxidizability is equal to 168 mgO/dm<sup>3</sup>, and limits of its changes vary from 10 to 1213 mgO/dm<sup>3</sup>. For waters from various bog microlandscapes, content of chemical components differ negligibly.

### Keywords:

*hydrochemical regime, chemical composition of the bog water, predominant ions, biogenic components, mezo-oligotrophic bog.*



### Введение

Гидрохимический режим и химический состав вод мезоолиготрофных болот, в отличие от евтрофных и олиготрофных [1, 2], — слабоизученная область гидрохимии поверхностных вод. Определяющим условием химического состава вод этих болот является источник их водного питания, которое в мезоолиготрофных болотах осуществляется путем их подпитки грунтовыми водами и атмосферными осадками. Грунтовые воды могут подпитывать болото со стороны суходола поверхностным стоком и непосредственно грунтовыми водами через дно болота путем напорного и

капиллярного поднятия. Если учесть, что содержание химических компонентов атмосферных осадков изменяется в узких пределах и их общая минерализация относительно небольшая, то и химический состав этих вод будет в основном формироваться под влиянием грунтовых вод. Но так как по мере роста болота подпитка изменяется вследствие увеличения мощности торфяной залежи при постоянстве химического состава поверхностного стока, то химический состав вод мезоолиготрофных болот также подвергается определенным изменениям.

В. И. Вернадский указывал, что «...для болот наблюдается более геологически быстрый темп естественного изменения, чем это существует для озер и рек» [3], поэтому рассматривается химический состав вод мезоолиготрофных болот на современной стадии их развития.

В настоящее время освоение заболоченных территорий в зоне добычи природных ресурсов и развития соответствующей инфраструктуры требует знаний о качестве вод болотных образований, в том числе и вод мезоолиготрофных болот.

### **Краткое описание болота, на котором проводились гидрохимические наблюдения**

*Пулозерский болотный массив* принадлежит к типичным мезоолиготрофным болотам провинции Финско-Кольской северной тайги и лапландских аапа. Болота здесь широко распространены благодаря плоскому равнинному рельефу и значительному превышению осадков над испарением [4, 5].

Болото расположено в бассейне р. Кола, в вытянутой с юга на север ложбине длиной 6 км и шириной 1–2 км. Прилегающие к ложбине с востока и запада холмы достигают высот 40–50 м. Почвы склонов холмов заболочены и лишь на северо-западе они загромождены осыпями горных пород. Суходолы, холмы и окрайки болот покрыты смешанным лесом с преобладанием ели и сосны.

Болотный массив принадлежит к периферически-мезоолиготрофному типу карело-финских аапа и по условиям залегания в рельефе относится к водораздельно-склоновым болотам. Склон направлен к водоприемнику о. Кол-озеро и р. Кола. Общий рельеф болота имеет вогнутую поверхность с заметным понижением от периферии к центральной части. Площадь рассматриваемой части массива равна 7.3 км<sup>2</sup>, всего водосбора — 20.6 км<sup>2</sup>.

Наиболее распространенные на болоте — грядово-мочажинный и аапа-комплексы, кустарничково-лишайниковый, сфагново-кустарничковый, редко облесенный сосной и сфагново-кустарничково-пушицевый микроландшафты.

Грядово-мочажинный комплекс, с грядами и сфагново-пушицевыми с примесью осок мочажинами, развит в центральной и восточной частях массива. Гряды, местами облесенные, покрыты сфагновыми мхами. В кустарничковом ярусе преобладают морошка и клюква. На грядах встречаются заросли кустарничковой березы и багульника.

Аапа-комплекс с кочками, покрытыми гипновыми мхами, встречается в восточной части массива. В мочажинах растительность мезо- или евтрофная.

Сфагново-кустарничковый, редко облесенный сосной микроландшафт занимает 15 % площади и расположен в юго-западной и центральной частях массива.

Сфагново-кустарничково-пушицевый микроландшафт, с мелкокочковатым или ровным микрорельефом, встречается на северной и восточной части болота. Произрастающая растительность представлена в основном сфагновыми, частично гипновыми мхами и пушицей. Местами произрастают одинокие сосны.

Кустарничково-лишайниковый микроландшафт примыкает к восточному берегу оз. Щучье и центру массива. Микрорельеф кочковатый. На кочках произрастают гипновые мхи, лишайники, карликовая береза, багульник, брусника и водяника.

Западная часть массива занята травяными топями, которые покрыты гипновыми мхами и травяной растительностью из осок, хвоща и пушицы.

### Методика исследований

Для изучения динамики гидрохимического режима в течение года и химического состава мезоолиготрофных болот были организованы многолетние стационарные исследования, которые проводились в виде комплексных гидрометеорологических полевых наблюдений на болотной станции Пулозеро. Одновременное проведение комплексных гидрологических, гидрохимических, метеорологических и гидрофизических наблюдений по единой программе, регламентированной Наставлением болотным станциям [6], позволяет детально выявить особенности формирования химического состава болотных вод во всех фазах гидрологического режима.

На исследуемом болоте отбор проб на определение химического состава болотных вод производился в господствующих микроландшафтах: кустарничково-лишайниковом и грядово-мочажинном комплексе, а также на ручье, вытекающем из болота. Частота отбора проб — 1–2 раза в месяц по всем пунктам наблюдений, дополнительно перед снеготаянием и на пике половодья.

Ежемесячно по методике, принятой в системе Росгидромет, отбиралась интегральная проба осадков для определения их химического состава.

Анализ химического состава болотных вод и атмосферных осадков проводился в специализированной лаборатории Мурманского управления гидрометеорологической службы (УГМС) по методикам, принятым в системе Росгидромета. В отобранных пробах воды определялись следующие компоненты: общая минерализация, главные ионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , а также фосфаты, кремний, железо, водородный показатель, перманганатная и бихроматная окисляемость. Содержание тяжелых металлов определялось эпизодически.

Результаты этих исследований использованы при анализе процесса формирования и оценки химического состава и качества болотных вод при выполнении настоящей работы.

### Гидрохимический режим болотных вод

Водное питание мезоолиготрофных болотных массивов осуществляется грунтовыми водами и атмосферными осадками, в меньшей мере — за счет поверхностно-сточных вод.

Проведенные на Пулозерском болотном массиве исследования показали, что гидрохимический режим и химический состав болотных вод тесно связан с гидрометеорологическими процессами, протекающими на этом болоте.

Значения общей минерализации болотных вод и атмосферных осадков, а также величины уровня болотных вод и промерзания болота приведены в табл. 1.

Увеличение общей минерализации на этом болоте в осенне-зимний период объясняется вытеснением ионов из солевого раствора при промерзании торфяной залежи, при промерзании общая минерализация увеличивается (табл. 1). Если в осенний период она составляет 15–20 мг/дм<sup>3</sup>, то при промерзании значительно возрастает — до 36.4 мг/дм<sup>3</sup> и более. При максимальной глубине промерзания наблюдается наибольшая минерализация болотных вод.

Анализ приращения общей минерализации в зависимости от глубины промерзания и исходной минерализации в конце осеннего периода, по данным наблюдений с 1979 по 1988 гг. в кустарничково-лишайниковом микроландшафте, показывает, что этот процесс имеет место во все годы наблюдений (табл. 2). Однако его интенсивность существенно различается. Удельное увеличение минерализации при приращении глубины промерзания на 1 см в этом микроландшафте изменяется от 0.65 до 4.44 (мг/дм<sup>3</sup>)/см при среднем значении 2.33 (мг/дм<sup>3</sup>)/см. В грядово-мочажинном комплексе эти характеристики соответственно равны: от 0.84 до 3.19 (мг/дм<sup>3</sup>)/см при среднем значении 1.75 (мг/дм<sup>3</sup>)/см. Увеличение общей минерализации воды в кустарничково-лишайниковом микроландшафте при промерзании болота достигает 235.6 мг/дм<sup>3</sup>, изменяясь в разные зимы от 42.4 до 235.6 мг/дм<sup>3</sup>, в грядово-мочажинном комплексе соответственно от 30.7 до 199.4 мг/дм<sup>3</sup> и 104.1 мг/дм<sup>3</sup>. Средние глубины промерзания в этих микроландшафтах равны: 54 см, изменяясь от 44 до 67 см; 59 см, изменяясь от 39 до 79 см.

Изменение общей минерализации вод грядово-мочажинного комплекса, атмосферных осадков, характеристик гидрометеорологического режима по данным наблюдений на болоте Пулозерское, 1989 г.

Месяц											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Общая минерализация болотных вод, мг/дм <sup>3</sup>											
50.7	37.1	36.0	36.4	9.6	29.3	42.0	21.6	20.0	21.6	18.0	15.0
Общая минерализация атмосферных осадков, мг/дм <sup>3</sup>											
11.2	9.4	7.5	8.0	7.8	11.7	22.4	20.0	12.2	19.2	24.0	8.0
Уровень болотных вод, см от поверхности болота											
29	30	31	38	33	31	33	32	34	31	32	31
Промерзший слой болота, см											
55	57	63	59	30	19	11	0	–	12	20	36
Талый слой болота, см											
–	–	–	–	29	46	59	–	–	–	–	–
Слой выпавших атмосферных осадков, мм											
53.1	16.1	30.5	16.1	68.2	104.2	161.8	105.2	53.8	33.3	62.0	27.7
Испарение с поверхности болота, мм											
–	–	–	–	11	52	52	25	–	–	–	–

Таблица 2

Увеличение общей минерализации воды в кустарничково-лишайниковом микроландшафте при промерзании болота

Зимний период	Общая минерализация, мг/дм <sup>3</sup>			Глубина промерзания, см	Удельный рост минерализации, (мг/дм <sup>3</sup> )/см
	исходная	приращение	в конце зимы		
1979–1980	20.0	184.8	204.8	67	2.76
1981–1982	33.5	185.8	219.3	44	4.22
1982–1983	21.9	235.6	257.5	53	4.44
1983–1984	12.7	62.2	104.9	43	2.14
1984–1985	19.6	82.4	102.0	50	1.65
1985–1986	28.0	97.8	125.8	57	1.72
1986–1987	21.0	42.4	63.4	65	0.65
1987–1988	8.3	52.6	60.9	50	1.05
Среднее	20.6	117.9	142.3	54	2.33

Результаты оценки общей минерализации в вегетационный период, полученные автором настоящей статьи, хорошо согласуются с данными работы [7], где минерализация в теплый период года на травяных болотах была в пределах 25–41 мг/дм<sup>3</sup>.

Получена зависимость общей минерализации вод кустарничково-лишайникового микроландшафта от глубины его промерзания для кустарничково-лишайникового микроландшафта (рис. 1). Она объективно свидетельствует об увеличении общей минерализации ( $M_{об.}$ , мг/дм<sup>3</sup>) болотных вод при увеличении промерзания болота ( $h$ , см) и имеет вид:

$$M_{об.} = 2.27h - 18.62.$$

Ее коэффициент корреляции не превышает 0.60, что свидетельствует о существовании других факторов, воздействующих на происходящий процесс увеличения минерализации.

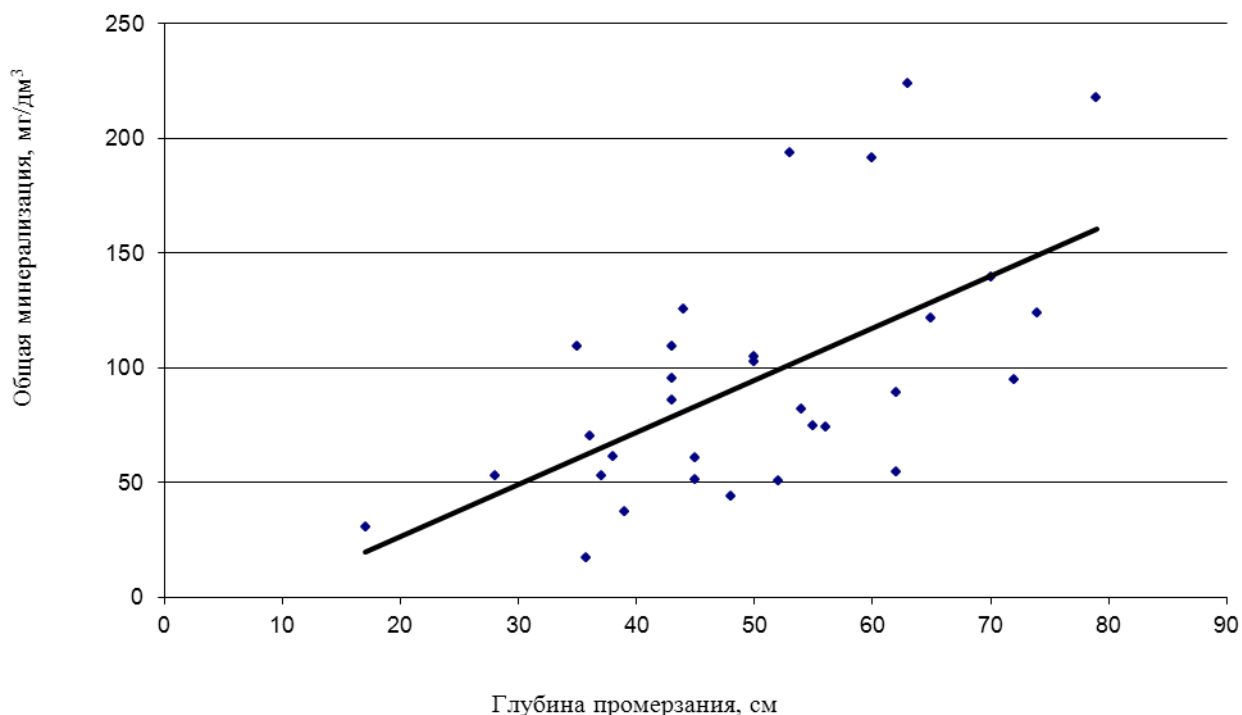


Рис. 1. Зависимость общей минерализации вод кустарничково-лишайникового микроландшафта от глубины его промерзания

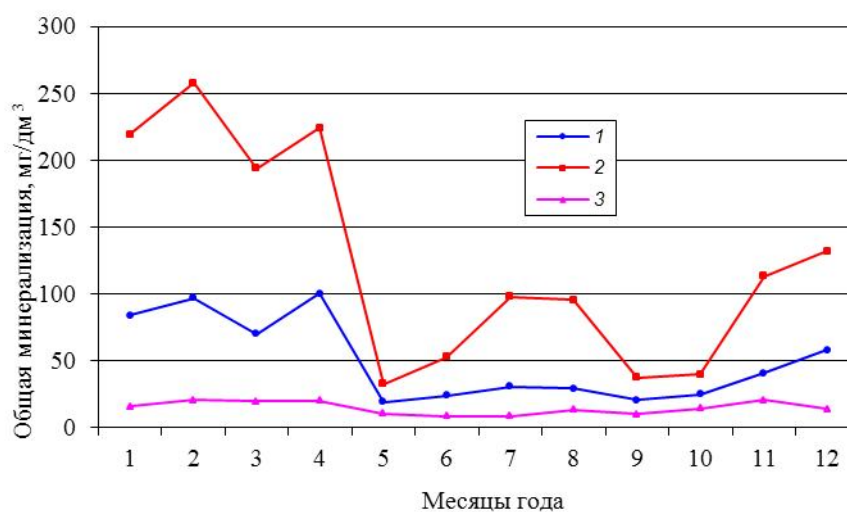


Рис. 2. Динамика среднемесячных (1), наибольших (2) и наименьших (3) значений общей минерализации вод кустарничково-лишайникового микроландшафта по данным наблюдений за многолетний период

В весенний период слой талых снеговых вод (более 230 мм), имеющий минерализацию в пределах 7.7–11.2 мг/дм<sup>3</sup> (табл. 1), разбавляет солевой состав талых слабоминерализованных болотных вод, и их минерализация в мае 1989 г. понизилась до 9.6 мг/дм<sup>3</sup>. Болотные воды с высокой минерализацией, которые образовались в зимний период, сохраняются в талой зоне ниже нижней границы промерзания и при оттаивании залежи путем капиллярного поднятия проникают в деятельный слой.

За многолетний период наблюдений минерализация болотных вод кустарничково-лишайникового микроландшафта в мае снижалась от средних наибольших значений до 7.2 мг/дм<sup>3</sup> (8.5–29.1 мг/дм<sup>3</sup>), в грядово-мочажинном комплексе соответственно 15.6 мг/дм<sup>3</sup> (6.7–30.3 мг/дм<sup>3</sup>). В мае — июне наблюдаются наименьшие значения минерализации вод мезоолиготрофных болот, которая в основном определяется малой минерализацией зимних атмосферных осадков. В среднем за зимние месяцы она не превышала 10 мг/дм<sup>3</sup>. Динамика среднемесячных, наибольших и наименьших величин общей минерализации болотных вод, осредненных за многолетний период наблюдений, приведена на рис. 2.

### Химический состав вод мезоолиготрофных болот

В таблице 3 приведены статистические характеристики компонентов химического состава болотных вод и атмосферных осадков по наблюдениям в грядово-мочажинном комплексе и кустарничково-лишайниковом микроландшафте за период с 1981 по 1993 гг. Средние и экстремальные содержания компонентов химического состава осадков практически во всех случаях меньше, чем в болотных водах за исключением содержания SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

Таблица 3

Статистические характеристики компонентов химического состава болотных вод и атмосферных осадков на Пулозерском болоте по наблюдениям с 1981 по 1993 гг.

Характеристики	Компоненты химического состава болотных вод, мг/дм <sup>3</sup>										pH
	сумма ионов	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	P	Si	Fe	
<b>Кустарничково-лишайниковый микроландшафт</b>											
Среднее	49.2	6.17	2.60	8.6	9.1	5.5	18.5	0.100	4.36	4.67	5.36
max	257.5	68.3	14.5	84.5	70.8	31.8	125.5	1.126	24.1	56.7	7.34
min	8.5	1.20	0.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.00	4.00
<b>Грядово-мочажинный комплекс</b>											
Среднее	38.8	4.41	1.98	6.7	4.8	4.4	16.9	0.343	3.37	4.84	5.23
max	217.6	14.0	7.00	51.0	67.1	41.7	129.7	6.41	22.8	17.8	6.23
min	6.7	0.60	0.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.11	3.80
<b>Диапазон изменения компонентов химического состава болотных вод в пределах болота</b>											
Среднее	44.0	5.29	2.29	7.6	6.9	4.9	17.7	0.222	3.86	4.76	5.30
max	257.5	68.3	14.5	84.5	70.8	41.7	129.7	6.41	24.1	56.7	7.34
min	6.7	0.60	0.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.06	3.80
<b>Атмосферные осадки</b>											
Среднее	28.1	4.00	1.19	3.47	6.3	6.2	5.6	0.0001	0.549	0.09	—
max	158.0	26.8	8.5	42.2	56.1	49.1	67.4	0.796	7.80	1.25	—
min	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.0	—

*Примечание.* Курсивом выделено значение элемента, содержание которого в атмосферных осадках меньше, чем в болотных водах.

В таблице 4 показаны результаты анализов болотных вод, отобранных в двух болотных микроландшафтах в течение 1989 г. Сравнение содержания ионов в этих микроландшафтах свидетельствует о незначительном количественном различии в процессе сезонной динамики элементов солевого состава болотных вод.



Величины общей минерализации главнейших ионов и других элементов в водах  
Пулозерского болотного массива по наблюдениям в 1989 г.

Месяц	рН	Содержание элементов, мг/дм <sup>3</sup>								Фос- фаты, мгР/дм <sup>3</sup>	Крем- ний, мгSi/д м <sup>3</sup>	Желе- зо, мгFe /дм <sup>3</sup>
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl	сум- ма			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Грядово-мочажинный комплекс, гряда												
I	5.28	5.4	3.3	3.2	0.9	7.3	3.9	23.0	50.7	0.056	10.0	10.60
II	5.68	7.6	2.2	5.0	2.2	8.5	3.1	14.5	37.1	0.184	8.4	16.60
III	5.46	5.6	2.3	6.1	2.2	9.8	1.8	13.5	34.2	0.146	9.6	7.12
IV	5.77	7.4	1.9	4.5	1.6	12.8	1.6	11.7	36.4	0.021	9.8	5.7
V	4.53	1.2	0.6	1.9	0.5	1.2	2.2	3.2	9.6	0.135	4.3	3.20
VI	5.22	4.4	2.6	2.9	1.0	1.2	16.8	3.5	29.0	0.000	6.4	2.10
VII	5.23	10.8	2.2	2.5	0.8	3.0	4.6	20.9	42.0	0.109	3.7	2.30
VIII	5.64	3.6	2.4	2.2	0.8	2.4	2.2	10.7	21.6	0.120	2.7	9.95
X	4.90	2.4	1.3	1.5	0.4	0.0	11.2	3.9	21.6	0.034	3.2	1.21
XI	4.85	3.0	1.7	2.2	0.5	0.0	9.5	3.5	18.0	0.090	4.4	1.15
XII	4.97	2.0	1.8	3.0	0.8	0.0	3.8	6.9	15.0	0.054	4.8	7.45
Кустарничково-лишайниковый микроландшафт												
I	4.93	2.4	1.9	2.2	4.2	0.0	3.5	7.8	15.8	0.005	4.6	1.60
II	4.00	3.6	1.9	2.5	4.4	0.0	4.2	9.9	20.1	0.000	5.0	3.00
III	4.38	4.4	1.1	2.1	0.9	0.0	1.5	11.3	19.3	0.000	6.2	2.93
IV	4.82	3.2	2.2	1.4	2.9	0.0	9.6	5.0	20.0	0.000	6.0	1.43
V	5.57	2.8	1.3	2.4	4.8	1.8	4.8	4.3	15.0	0.203	5.0	0.66
VI	4.60	2.4	1.3	2.3	3.1	0.0	8.2	4.2	17.6	0.189	6.8	1.77
VII	4.65	4.0	1.9	1.9	3.2	0.0	2.9	11.5	20.8	0.055	2.4	0.63
VIII	4.30	2.2	1.5	2.4	3.0	0.0	3.4	6.0	13.4	0.000	2.8	1.48
X	4.10	3.6	1.6	1.6	1.2	0.0	6.5	7.5	20.2	0.086	2.4	1.20
XI	4.20	2.0	0.5	1.3	1.5	0.0	7.1	2.5	14.1	0.068	1.7	0.75
XII	4.38	2.4	1.9	1.4	1.0	0.0	4.0	11.0	21.6	0.087	1.4	1.14

Характерная черта вод мезоолиготрофного болота — существенное изменение водородного показателя от 4.0–5.0 до 7.36 рН. Слабокислая реакция среды (4.25–5.2 рН) наблюдается к концу вегетационного периода, приближаясь затем к слабощелочной (до 6.0–7.36 рН).

Катионный состав вод мезоолиготрофных болот представлен кальцием, магнием, натрием и калием; анионный — сульфатами и хлоридами.

*Кальций* — регулятор кислотности торфа и при малых его содержаниях полностью связан с органическими соединениями болотных вод [8]. Его среднее содержание в болотных водах по сравнению с атмосферными осадками в 2.5 раза больше. Содержание кальция увеличивается с увеличением общей минерализации.

*агний* играет существенную роль в развитии и функционировании растительного покрова. Он входит в состав хлорофилла [9]. Его содержание в болотных водах равно 2.60 мг/дм<sup>3</sup>, что в 2.3 раза меньше по сравнению с кальцием.

*Калий* является основным элементом питания растений, поглощается ими практически полностью. Содержания его в болотных водах изменяется в пределах от 0.4 до 5.6 мг/дм<sup>3</sup>, в среднем не превышая 1.8 мг/дм<sup>3</sup>.

*Натрий* в болотных водах содержится также в небольших количествах: от 0.3 до 7.4 мг/дм<sup>3</sup>, в среднем — 3.2 мг/дм<sup>3</sup>.

*Гидрокарбонатный ион* среди анионов в водах мезоолиготрофных болот обладает наибольшей изменчивостью. Его содержание изменяется от 0 до 70.8 мг/дм<sup>3</sup>. Это происходит потому, что воды атмосферных осадков, выпадая на болото и взаимодействуя с кислыми болотными водами, теряют этот ион. В кислых водах он полностью отсутствует. Но по мере улетучивания двуокиси углерода с болотных вод увеличивается щелочность среды, значение pH возрастает. Слабокислая среда изменяет свои свойства на слабощелочную. Гидрокарбонатный ион в водах этих болот появляется в том случае, когда водородный показатель становится более 5–5.05 pH. Зависимость его содержания от водородного показателя приведена на рис. 3 и аппроксимирована выражением вида:

$$I_{\text{HCO}_3^-} = 0.58(\text{pH})^3 - 6.21(\text{pH})^2 + 20.38(\text{pH}) - 17.9,$$

где  $I_{\text{HCO}_3^-}$  — содержание гидрокарбонатного иона, мг/дм<sup>3</sup>. Коэффициент корреляции  $R = 0.83$ . Уравнение справедливо в диапазоне изменения от 5.05 до 7.5 pH. При pH = 7.5 содержание  $\text{HCO}_3^-$  достигает 39 мг/дм<sup>3</sup>. Большое содержание этого иона заметно влияет на общую минерализацию. Зависимость ее от содержания гидрокарбонатного иона ( $I_{\text{HCO}_3^-}$ , мг/дм<sup>3</sup>) имеет вид:

$$M_{\text{об.}} = 1.64 I_{\text{HCO}_3^-} + 32.6 \text{ при } R = 0.56.$$

При столь больших значениях содержания ионов хлора устанавливается тесная зависимость между их содержанием и общей минерализацией болотных вод. Зависимость представлена на рис. 4 и аппроксимируется уравнением:

$$M_{\text{об.}} = 1.93 I_{\text{Cl}^-} + 11.5 \text{ при } R = 0.87,$$

где  $I_{\text{Cl}^-}$  — содержание ионов хлора, мг/дм<sup>3</sup>.

Сравнение содержания ионов хлора в атмосферных осадках и болотных водах (табл. 3) показывает, что в последних его в 2 раза больше, чем в осадках. Это свидетельствует о подпитке болота грунтовыми водами. При незначительном содержании ионов хлора — до 5 мг/дм<sup>3</sup> (левая сторона графика на рис. 4), основной вклад в увеличение общей минерализации до 100 мг/дм<sup>3</sup> вносят атмосферные осадки, вследствие чего линейная зависимость нарушается. Аномально высокие содержания ионов хлора обнаруживаются в атмосферных осадках при западном переносе воздушных масс.

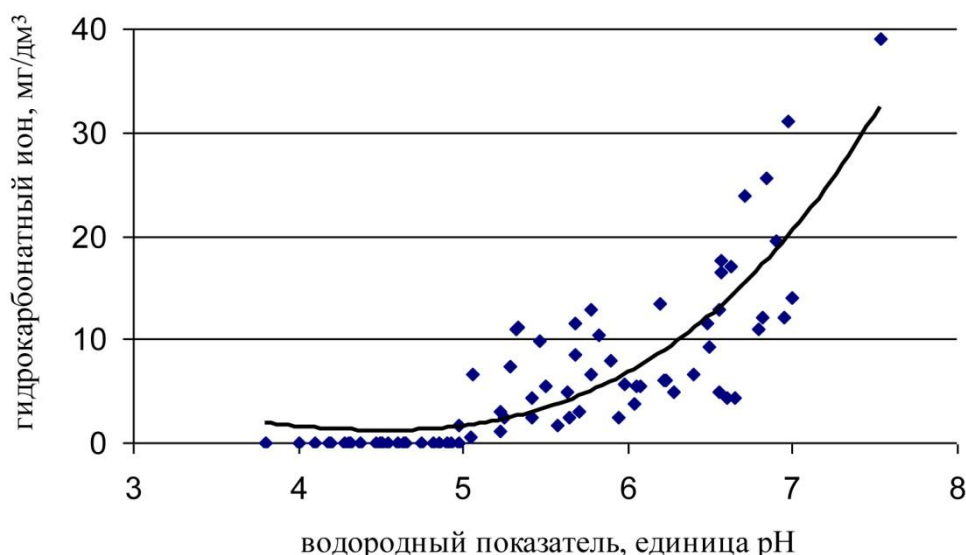


Рис. 3. Зависимость содержания гидрокарбонатного иона от водородного показателя вод мезоолиготрофного болота

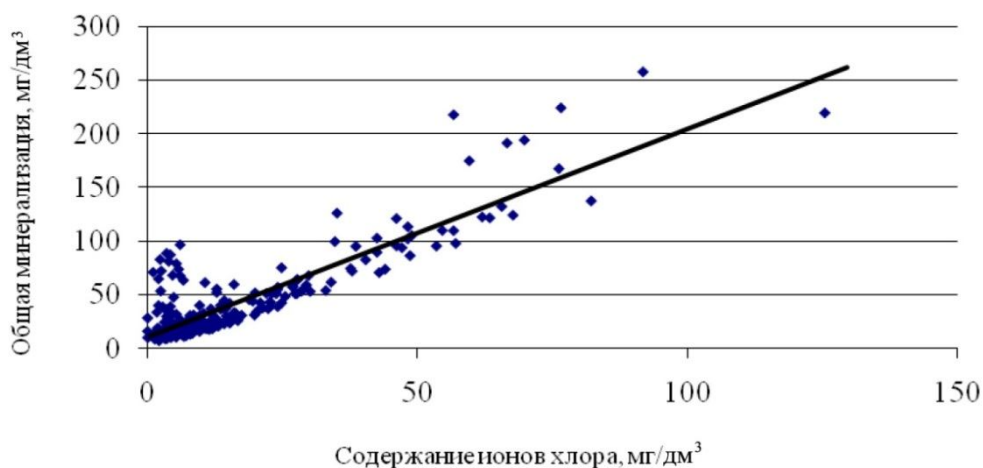


Рис. 4. Зависимость общей минерализации болотных вод от содержания ионов хлора

Биогенные вещества в болотных водах представлены соединениями азота ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), фосфора, кремния и железа.

*Азот аммонийный* ( $\text{NH}_4^+$ ) в водах мезоолиготрофного болота содержится практически в течение всего года. Наибольшие его значения (до  $4.0 \text{ мг/дм}^3$ ) наблюдаются в зимний период, весной его содержание уменьшается и в период вегетации понижается до минимальных значений. Среднемесячное его значение, определенное за многолетний период, —  $1.36 \text{ мг/дм}^3$ .

*Азот нитратный* ( $\text{NO}_3^-$ ) в минимальных количествах наблюдается в вегетационный период ( $0\text{--}0.12 \text{ мг/дм}^3$ ), увеличивается осенью и достигает максимума зимой (до  $0.60\text{--}0.80 \text{ мг/дм}^3$ ). Среднемесячное его содержание в кустарничково-лишайниковом микроландшафте —  $0.16 \text{ мг/дм}^3$ , в грядово-мочажинном комплексе —  $0.22 \text{ мг/дм}^3$ .

*Азот нитритный* ( $\text{NO}_2^-$ ) в вегетационный период наблюдается крайне редко. Осенью его содержание возрастает до  $0.03\text{--}0.06 \text{ мг/дм}^3$  и далее в зимний период достигает наибольших значений, до  $0.165 \text{ мг/дм}^3$ .

Содержание *общего фосфора* в водах мезоолиготрофного болота изменяется в значительных пределах — от 0 до  $2.99 \text{ мгP/дм}^3$ , в среднем —  $0.22 \text{ мгP/дм}^3$ . Его годовая динамика хорошо выражена: в декабре — марте наблюдаются наибольшие значения, наименьшие — в период вегетации болотной растительности (рис. 5). Причем в наиболее проточном кустарничково-лишайниковом микроландшафте его среднемесячное содержание в три раза превышает содержание в водах слабопроточного грядово-мочажинного комплекса ( $0.10$  и  $0.32 \text{ мгP/дм}^3$  соответственно).

Минеральные примеси в виде пыли земного или космического происхождения, а также содержащиеся в грунтовых водах, служат источником появления в болотных водах кремния и в меньшей степени железа.

*Кремний* в значительном количестве образуется при распаде растений и отмирании микроорганизмов. В водах болотного массива Пулозерский его содержание находится в пределах от 0 до  $24.1 \text{ мгSi/дм}^3$ . Его среднее многолетнее значение в кустарничково-лишайниковом микроландшафте равно  $4.52 \text{ мгSi/дм}^3$ ; в грядово-мочажинном комплексе —  $3.62 \text{ мгSi/дм}^3$ . Годовая динамика в таких микроландшафтах хорошо выражена и имеет максимум содержания в холодный период года, при промерзании болота, и минимум — в период вегетации болотной растительности (рис. 5).

*Железо общее* также обнаружено в воде мезоолиготрофного болота в значительном количестве. Пределы его изменения за многолетний период составляют от 0 до  $56.7 \text{ мгFe/дм}^3$ . Среднемесячные значения за этот же период для вод кустарничково-лишайникового микроландшафта и грядово-мочажинного комплекса равны  $5.24$  и  $5.00 \text{ мгFe/дм}^3$  соответственно. Концентрация железа общего подвержена значительным сезонным колебаниям (рис. 5).

Максимум наблюдается в холодный период года, далее его содержание уменьшается в 3–4 раза и в период вегетации наблюдается минимум.

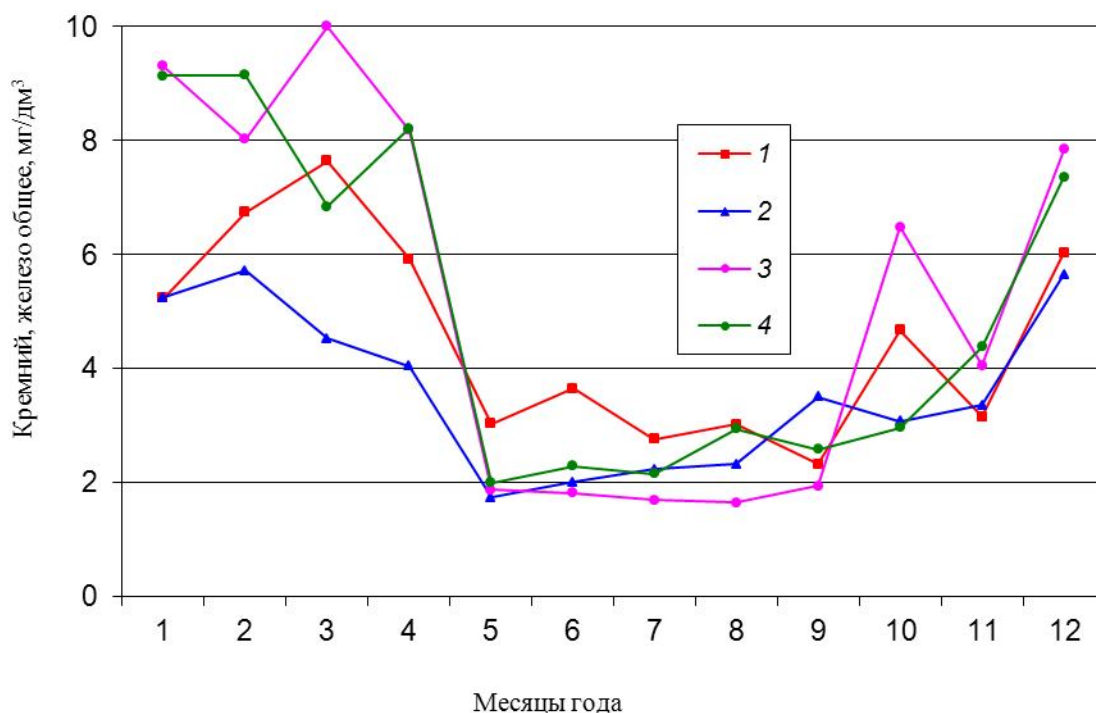


Рис. 5. Годовая динамика среднемесячных величин кремния (1, 2) и железа общего (3, 4) в водах кустарничково-лишайникового микроландшафта (1, 3) и грядово-мочажинного комплекса (2, 4) по данным наблюдений за период 1981–1993 гг.

В водах мезоолиготрофных болот присутствует значительное количество растворенного органического вещества. Основной источник его поступления в воды болот — процесс торфообразования, в результате которого образуются органические гуминовые и фульвокислоты, что вообще характерно для северной гумидной зоны. Поэтому между окисляемостью и водородным показателем как характеристикой среды, обусловленной присутствием органических кислот, существует взаимосвязь: с увеличением окисляемости рН уменьшается.

Величину содержания органического вещества оценивают косвенным путем по затратам кислорода при его окислении перманганатным или бихроматным методом. Степень окисления бихроматом в крепком растворе серной кислоты близка к 100 %. На практике обычно используют перманганатный метод. Между перманганатной ( $Q_{\text{пер.}}$ , мгО/дм<sup>3</sup>) и бихроматной ( $Q_{\text{бих.}}$ , мгО/дм<sup>3</sup>) окисляемостью для вод мезоолиготрофных болот существует следующая зависимость:

$$Q_{\text{бих.}} = 0.833 Q_{\text{пер.}} + 99.6$$

при коэффициенте корреляции, равном 0.64.

Среднеголетняя величина бихроматной окисляемости, определяемая по среднемесячным значениям, для вод кустарничково-лишайникового микроландшафта равна 141.9 мгО/дм<sup>3</sup>, наибольшая — 1191 мгО/дм<sup>3</sup>, наименьшая — 2.1 мгО/дм<sup>3</sup>; для вод грядово-мочажинного комплекса — 168.2, 1213 и 10.0 мгО/дм<sup>3</sup> соответственно.

Сезонное изменение бихроматной окисляемости характеризуется минимальным содержанием органического вещества весной и в летнюю межень и наибольшими величинами в холодный период года вне зависимости от типа болотного микроландшафта (рис. 6). Весеннее

уменьшение органического вещества обусловлено разбавлением высокогумифицированных болотных вод талыми снеговыми водами.

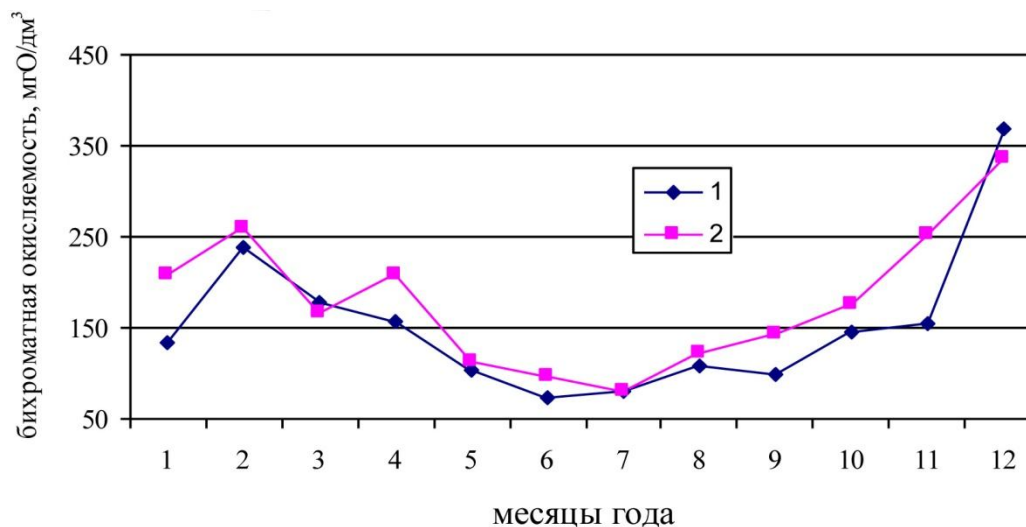


Рис. 6. Динамика среднемесячных величин бихроматной окисляемости в кустарничково-лишайниковом микроландшафте (1) и грядово-мочажинном комплексе (2) по данным наблюдений за период 1981–1993 гг.

Воды мезоолиготрофного болота обладают общекислотной агрессивностью на бетон и железобетонные изделия, так как их водородный показатель меньше 6.5 рН и коэффициент фильтрации деятельного слоя торфяной залежи больше 0.1 м/сут.

## Выводы

Оценка динамики гидрохимического режима и химического состава болотных вод выполнена на основе многолетних комплексных гидрометеорологических наблюдений на мезоолиготрофном болотном массиве Пулозерское.

Установлено, что гидрохимический режим болотных вод тесно связан с гидрометеорологическим режимом болотного массива. Наибольшая минерализация болотных вод наблюдается в зимний период (в среднем 70–100 мг/дм<sup>3</sup>), когда при промерзании торфяной залежи происходит вытеснение ионов солевого раствора растущими кристаллами льда. В весенний период при снеготаянии минерализация болотных вод уменьшается вследствие разбавления слабоминерализованными талыми водами. Наименьшие значения минерализации болотных вод наблюдается в меженный период (19–25 мг/дм<sup>3</sup>), когда часть ионов поглощается при вегетации болотной растительностью. В осенний период, по мере прекращения вегетации и подъема уровня болотных вод, их минерализация возрастает.

Основные источники формирования химического состава болотных вод — атмосферные осадки и грунтовые воды, существенно трансформированные под влиянием биологических процессов, происходящих в деятельном слое торфяной залежи.

Путем статистической обработки установлены среднемесячные и предельные значения химических компонентов болотных вод мезоолиготрофного болота.

Среднее многолетнее содержание растворенного органического вещества, определенного по бихроматной окисляемости, в водах грядово-мочажинного комплекса равно 168 мгО/дм<sup>3</sup> и изменяется в пределах от 10 до 1213 мгО/дм<sup>3</sup>. Сезонная динамика органического вещества определяется максимумом в холодный период года и минимумом в период вегетации болотной растительности.

Результаты исследования являются основными гидрохимическими показателями вод мезоолиготрофных болот в их естественном состоянии и могут быть приняты за эталон сравнения для оценки влияния технических мероприятий на качество их вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калюжный И. Л., Левандовская Л. Я. Гидрохимический режим и химический состав вод олиготрофных болотных массивов // Труды ГГИ. 1974. Вып. 222. С. 99–118.
2. Потапова Т. М., Иванов К. Е., Фирсанов Д. В. Гидрохимическая характеристика неосушенных верховых болот Северо-Запада ЕТС // Гидрохимические материалы. 1987. Т. ХСVIII. С. 54–64.
3. Вернадский В. И. Избранные сочинения. М.: АН СССР, 1960. Т. 4, кн. 2. 500 с.
4. Временное руководство по проектированию и строительству осушительных систем в Мурманской области. Л.: СевНИИГим, 1982. 90 с.
5. Евзеров В. Я. Торфяные месторождения Мурманской области // Вестник ВГУ. Серия «Геология». 2012. № 2. С. 153–157.
6. Наставление гидрологическим станциям и постам // Гидрометеорологические наблюдения на болотах. Л: Гидрометеиздат, 1990. Вып. 8. 360 с.
7. Блинова И. В., Петровский М. Н. К характеристике минеротрофных травяных болот в центральной части Мурманской области и о необходимости их охраны // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 3 (18). С. 38–55.
8. Ефимов В. Н. Формы аккумуляции и миграции веществ в болотных почвах // Почвоведение. 1961. № 6. С. 25–29.
9. Черняев А. М., Черняева Л. Е., Еремеева М. Е. Гидрохимия болот. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 430 с.

**Сведения об авторе**

*Калюжный Игорь Леонидович* — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом гидрофизики ФГБУ «Государственный гидрологический институт  
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.* Гидрохимический режим и химический состав вод мезоолиготрофных болотных массивов Кольского полуострова / *И. Л. Калюжный* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 3 (26). — С. 114–125.

**Reference**

*Kalyuzhny Igor L.* Hydrochemical Regime and Chemical Composition of Water from Mezo-Oligotrophic Boggy Lands with in the Kola Peninsula. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 3 (26), pp. 114–125. (In Russ.).

УДК 519.673:004.9

## ОРГАНИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННО-ПРИРОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ\*

**А. Я. Фридман**

ФГБУН Институт информатики и математического моделирования КНЦ РАН

### Аннотация

Рассмотрены особенности управления ходом имитационного моделирования сложных пространственных динамических объектов — промышленно-природных комплексов (ППК). Для организации имитационного режима системы ситуационного моделирования ППК предложено событийное планирование имитации с применением процессного способа организации квазипараллелизма. Отличие такого способа выполнения имитации состоит в том, что при неготовности входных ресурсов для запуска некоторого процесса делается попытка запустить порождающие их процессы, для чего формируется новый список активизируемых процессов, и только при невозможности сделать это имитация приостанавливается до получения указаний пользователя. В практическом аспекте это позволяет повысить устойчивость имитационного режима к оперативным изменениям концептуальной модели ППК.

### Ключевые слова:

*имитационное моделирование, промышленно-природный комплекс, событийное планирование имитации, процессный способ организации квазипараллелизма.*

### PLANNING OF SIMULATION FOR INDUSTRY-NATURAL COMPLEXES

**Alexander Ya. Fridman**

Institute for Informatics and Mathematical Modelling of the KSC of the RAS

### Abstract

This paper presents organizational features of simulation for complicated spatial dynamic objects, namely Industry-Natural Complexes (INCs). In the situational modeling system for INCs, the simulation mode is proposed to organize by event-driven simulation using process-oriented method to imitate quasi-parallelism. This approach to simulation is distinguished with the following. If any input resources of a certain process are not ready-to-use, the job scheduler attempts to run processes generating these resources. With this purpose, it forms a new list of processes to be activated. Only if this does not work, the scheduler suspends simulation till getting a user instruction. In practical aspect, the proposed approach increases robustness of simulation at operative changes of the INC conceptual model.

### Keywords:

*simulation, Industry-Natural Complex, event-driven simulation, process-oriented method to imitate quasi-parallelism.*



### Введение

В рамках имитационного подхода алгоритмы, моделирующие функционирование составных частей объекта, позволяют по исходным данным, содержащим сведения о начальном состоянии объекта, и фактическим значениям его параметров отобразить реальные явления, получить сведения о возможном поведении объекта для данной конкретной ситуации и принять на основании этой информации соответствующие решения. Известно, однако, что предсказательные возможности имитационного моделирования значительно меньше, чем у аналитических моделей.

---

\* Работа частично поддержана грантами РФФИ (проекты №№ 14-07-00256-а, 14-07-00257-а, 15-07-04760-а, 15-07-02757-а, 16-29-04424-офи\_м, 16-29-12901-офи\_м).

Сам термин «имитационное моделирование» означает, что с помощью используемых математических моделей результат нельзя заранее вычислить или предсказать, поэтому для прогноза поведения реального объекта необходим эксперимент (имитация) на модели при заданных исходных данных.

Имитация представляет собой численный метод проведения компьютеризованных экспериментов с моделями, описывающими поведение объекта в течение заданного или формируемого периода времени, которое в имитационной модели (ИмМ) чаще всего описывается набором алгоритмов, реализуемых на некотором языке (языках) моделирования. Имитируя различные реальные ситуации на ИмМ, исследователь или ЛПР получает возможность оценить эффективность различных принципов управления системой, сравнить варианты структуры объекта, определить степень влияния изменений его параметров и начальных условий имитации на показатель(и) эффективности.

На основании опыта имитационного моделирования сложных систем [1–4] рекомендуется использовать ИмМ в следующих случаях:

1. Если не существует законченной постановки задачи исследования и идет процесс познания объекта моделирования. Имитационная модель служит средством изучения явления.

2. Если аналитические методы имеются, но математические процедуры столь сложны и трудоемки, что имитационное моделирование дает более простой способ решения задачи.

3. Когда, кроме оценки влияния параметров объекта, желательно наблюдать за поведением его компонентов в течение определенного периода.

4. Когда имитационное моделирование оказывается единственным способом исследования системы из-за невозможности наблюдения каких-либо (например критических) явлений в реальных условиях.

5. Когда необходимо контролировать протекание процессов в объекте путем замедления или ускорения явлений в ходе имитации.

6. При подготовке специалистов и освоении новой техники, когда ИмМ дает возможность приобретения необходимых навыков эксплуатации объекта.

7. Когда изучаются новые ситуации в объекте исследования, о которых мало что известно или не известно ничего. В этом случае имитация служит для предварительной проверки новых стратегий и правил принятия решений перед проведением экспериментов на реальном объекте.

8. Когда особое значение имеет последовательность событий в проектируемом объекте и модель используется для предсказания узких мест в функционировании объекта и других трудностей, появляющихся в поведении объекта при введении в него новых компонентов.

В исследуемой проблематике моделирования ППК актуальны все перечисленные варианты использования имитационных моделей, кроме, возможно, второго, который более характерен для давно изучаемых, “устоявшихся” предметных областей. Кроме того, для предлагаемого подхода принципиально важна возможность интегрирования в единую систему моделирования моделей компонентов объекта, построенных разными группами исследователей в разное время и, соответственно, имеющих различные динамические параметры (шаг дискретности, порядок модели и т. д.) и даже различные принципы внутренней организации (например, чисто логические, автоматные и аналитические модели).

Однако имитационные модели наряду с перечисленными достоинствами имеют и существенные недостатки. Разработка хорошей ИмМ часто обходится дороже создания аналитической модели и требует больших временных затрат. Р. Шеннон показал в [4], что ИмМ в принципе неточна и невозможно измерить степень этой неточности. Тем не менее, имитационное моделирование — один из наиболее широко используемых методов при решении задач синтеза и анализа сложных систем. К достоинствам имитационного метода с точки зрения его использования в ситуационной системе моделирования (ССМ) [5], разрабатываемой для моделирования ППК, относятся также: возможность описания поведения компонентов объекта на высоком уровне детализации, отсутствие ограничений на вид зависимостей между



параметрами ИмМ и состоянием внешней среды, возможность исследования динамики взаимодействия компонентов во времени и пространстве параметров системы.

### Основы имитационного моделирования

Существует множество толкований основных определений таких понятий, как имитационная модель, компоненты и параметры модели, функциональные зависимости, ограничения, целевые функции моделирования. В дальнейшем используются определения, приведенные Р. Шенноном [4].

1. Каждая модель представляет собой некоторую комбинацию таких составляющих, как компоненты, переменные, параметры, функции, ограничения, целевые функции.

2. Под компонентами понимают составные части, которые при соответствующем объединении образуют систему. Иногда компонентами считают также элементы системы или ее подсистемы. Система определяется как группа или совокупность объектов, объединенных некоторой формой регулярного взаимодействия или взаимозависимости для выполнения заданной функции. Изучаемая система состоит из компонентов.

3. Параметрами являются величины, которые исследователь может выбирать произвольно, в отличие от переменных модели, которые принимают только значения, определяемые видом данной функции. В модели системы различают переменные двух видов — экзо- и эндогенные. Экзогенные переменные называются также входными. Это означает, что они порождаются вне системы или являются результатом взаимодействия внешних причин. Эндогенными переменными называются переменные, возникающие в системе в результате воздействия внутренних причин. В тех случаях, когда эндогенные переменные характеризуют состояние или условия, имеющие место в системе, назовем их переменными состояния. Когда же необходимо описать входы и выходы системы, мы имеем дело с входными и выходными переменными.

4. Функциональные зависимости описывают поведение переменных и параметров в пределах компонента или же выражают соотношения между компонентами системы. Эти соотношения по своей природе являются либо детерминистскими, либо стохастическими. Оба типа соотношений обычно выражаются в виде алгоритмов, которые устанавливают зависимость между переменными состояниями и экзогенными переменными.

5. Ограничения представляют собой устанавливаемые пределы изменения значений переменных или условия их изменений. Они могут вводиться либо разработчиком, либо устанавливаться самой системой вследствие присущих ей свойств. В ССМ ППК эти ограничения естественно реализуются принятым списковым форматом представления данных.

6. Целевая функция (функция критерия) представляет собой точное отображение целей или задач системы и необходимых правил оценки их выполнения. Выражение для целевой функции должно быть однозначным определением целей и задач, с которыми соизмеряются принимаемые решения. Как уже упоминалось, целевые функции в ССМ обязательны для всех объектов — компонентов объекта исследования — и могут приписываться каждому процессу, моделирующему то или иное преобразование данных.

При реализации ИмМ используются обычно три представления времени:  $t_R$  — реальное время системы, работа которой имитируется на данной ИмМ;  $t_0$  — модельное время (системное), по которому организуется синхронизация событий в системе;  $t'$  — машинное время имитации, отражающее затраты этого ресурса компьютера на организацию имитации.

С помощью модельного времени организуется синхронизация всех событий  $C_{ij}$  в модели и выполнение алгоритмов  $АЛ_{ij}$  компонентов  $K_i$  модели системы, течение времени внутри которых отображается “локальными” временами  $t_i$ . Предполагается, что на заданных временных интервалах  $\tau_{ij}$  между последовательными моментами  $t_i$  функционирование каждого алгоритма  $АЛ_{ij}$  (выполнение им некоторого функционального действия  $\Phi'_{ij}$ ) не требует вмешательства внешнего управляющего устройства. Таким образом реализуется квазипараллельная работа компонентов ИмМ. Приставка “квази-” в данном случае отражает последовательный характер обслуживания в ИмМ событий, одновременно возникающих в разных компонентах реальной системы.

Корректировка временных координат  $t_i$  нескольких  $K_i$  ИмМ осуществляется с помощью модельного времени  $t_0$  следующим образом. Если значения  $t_i$  при выполнении АЛ<sub>ij</sub> нескольких  $K_i$  совпадают (это означает, что в реальной системе происходит одновременно несколько событий  $C_{ij}$ ), последовательно обслуживаются АЛ<sub>ij</sub>, совпадающие по времени выполнения, т. е. имеющие одинаковые значения  $t_{ij}$ . Здесь и далее под  $t_{ij}$  будем понимать конкретное значение  $t_i$ , при котором происходит событие  $C_{ij}$ . При этом модельное время  $t_0$  не меняется до окончания выполнения всех совпавших по времени реализации алгоритмов АЛ<sub>ij</sub>. Таким способом последовательно выполняются соответствующие ФД'<sub>ij</sub> при неизменном значении  $t_0$ . После каждой реализации АЛ<sub>ij</sub>, обеспечивающей выполнение в ИмМ ФД'<sub>ij</sub>, производится корректировка временной координаты  $t_{ij}$ . Чаще всего эта корректировка сводится к вычислению нового значения  $t_{ij}$  по формуле  $t_{ij} = t_0 + \tau_{ij}$ . Это значение временной координаты  $t_i$  запоминается и используется в дальнейшем для определения момента новой активизации в ИмМ компонента  $K_i$ . Под активизацией компонента модели  $K_i$  будем понимать начало выполнения следующей его активности (выполнение алгоритма АЛ<sub>ij</sub> и оператора корректировки временной координаты  $t_i$ ).

Когда имитация одновременно появившихся событий  $C_{ij}$  завершена, выполнены соответствующие алгоритмы активностей АЛ<sub>ij</sub> и проведены корректировки временных координат  $t_i$ , меняется значение глобальной переменной модели  $t_0$ .

### *Способы изменения модельного времени*

Существуют два способа изменения  $t_0$ : с помощью фиксированных и переменных интервалов изменения модельного времени. Часто их называют соответственно способами фиксированного шага и шагов до следующего события.

Независимо от способа изменения  $t_0$ , механизм регламентации изменения модельного времени обычно предусматривает выполнение следующих действий:

выбор событий в модели, которые необходимо обслужить при одном и том же модельном времени  $t_0$ ;

обслуживание событий (инициализация активностей), которые имеют одинаковое время инициализации;

по окончании обслуживания всех одновременных (в пределах шага) событий определение очередного значения модельного времени;

корректировка временной координаты модели  $t_0$ ;

проверка условий окончания моделирования либо по времени завершения имитации, либо по выполнению других событий в системе.

Предпочтение способу фиксированного шага отдается в двух случаях. Во-первых, когда события  $C_{ij}$  распределены равномерно на всем интервале моделирования и исследователь может подобрать интервал изменения временной координаты  $\Delta t$ , обеспечивающий минимальную погрешность имитации. Во-вторых, когда событий очень много и они появляются группами. Во всех остальных случаях способ задания шага до следующего события более предпочтителен. Если события  $C_{ij}$  распределены неравномерно и появляются через значительные временные интервалы  $\tau_{ij}$ , способ задания шага до следующего события экономичнее и точнее способа фиксированного изменения  $t_0$ . Поскольку часть или даже большинство моделей составных частей ППК разрабатываются независимо друг от друга, разными исследователями и должны оперативно интегрироваться в систему моделирования, для имитационного режима работы ССМ более пригоден способ шага до следующего события, который и рассматривается в дальнейшем.

Для обеспечения синхронной работы исполнителей с различными тактовыми частотами в ИмМ происходит аппроксимация каждого происходящего на реальном объекте за заданный временной интервал функционального действия ФД<sub>ij</sub> парой действий: упрощенным функциональным действием ФД'<sub>ij</sub> и модификацией временной координаты  $i$ -го компонента модели  $t_i$ . Эта пара действий представляет собой «молекулу» ИмМ и называется активностью АК<sub>ij</sub>. Любая АК<sub>ij</sub> состоит из описания алгоритма АЛ<sub>ij</sub> и оператора модификации временной

координаты компонента модели  $Mt_{ij}$ . Кроме модификации модельного времени  $t_0$  и выполнения операторов  $Mt_{ij}$ , в функции модуля управления имитацией (МУИ) входят: запуск на выполнение алгоритмов  $AL_{ij}$ , организация взаимодействия  $AL_{ij}$  друг с другом в ходе имитации и проверка условий окончания имитации. Таким образом, любая ИмМ реализуется как совокупность набора «молекул», отражающих поведение объекта имитации, и МУИ, организующего взаимодействие этих «молекул» друг с другом.

#### *Способы организации квазипараллелизма*

В моделях сложных систем состав активностей в разных компонентах и характер их взаимодействия друг с другом могут быть различными. В одних системах все  $FD_{ij}$  различны и для реализации каждого алгоритма  $AL_{ij}$  активности в модели требуется выполнение своих условий. Такая ситуация часто встречается в системах массового обслуживания. В других системах некоторые  $FD_{ij}$  в разных компонентах аналогичны, совпадают по времени и приводят к одному и тому же событию  $C_{ij}$ . Для реализации в ИмМ каждой такой группы  $FD_{ij}$  одним алгоритмом  $AL_{ij}$  требуется выполнение своих определенных условий. Для некоторых систем существует сильное взаимодействие между  $FD_{ij}$ , которые можно аппроксимировать явно задаваемыми математическими зависимостями при создании ИмМ. В зависимости от состава алгоритмов  $AL_{ij}$ , наличия связей между компонентами, целей и задач моделирования выбирается тот или иной способ представления  $K_i$  и реализации активностей в имитационных моделях. Наибольшее распространение получили пять способов описания ИмМ: непосредственно активностями, аппаратом событий, транзактами, агрегатами, процессами. Каждому способу описания модели соответствует свой способ организации квазипараллелизма при обслуживании с помощью МУИ активностей, из которых составлена ИмМ. Поэтому различают соответственно следующие способы организации квазипараллелизма: просмотр активностей, составление расписания событий, управление обслуживанием транзактов, управление агрегатами, синхронизация процессов [3].

Один и тот же объект исследования принципиально можно представить любым из указанных способов, однако ИмМ, построенные на их основе, будут отличаться размерами и количеством ресурсов, затрачиваемых на их создание, испытание и использование. Приведем краткое описание особенностей каждого из этих способов организации квазипараллелизма.

При использовании *способа просмотра активностей* имитация представляет собой чередование выполнения алгоритмов активностей, операторов модификации временной координаты  $t_i$  и алгоритма МУИ. Вся ИмМ представляет собой набор активностей  $AK_{ij}$ , каждая из которых после выполнения на компьютере возвращает управление МУИ. Этот способ выгоден только при наличии достаточно простых алгоритмов проверки выполнимости условий инициализации активностей, что в ССМ не имеет места.

При выборе *способа составления расписания событий* ИмМ создается в виде двух частей: множества активностей  $\{AK_{ij}\}$  и набора процедур проверки появления событий и инициализации соответствующих активностей. При этом каждая  $AK_{ij}$  имитирует выполнение группы совпавших функциональных действий  $FD_{ij}$  у различных компонентов  $K_i$  системы. Из-за того, что происходит объединение активностей различных компонентов в составе процедур обслуживания событий, описание ИмМ часто теряет сходство со структурой реальной системы, что может затруднить анализ результатов моделирования и модификацию ИмМ и, следовательно, в ССМ нежелательно.

*Транзактный способ организации квазипараллелизма* применяется при одинаковых функциональных действиях  $FD_{ij}$  компонентов реальной системы и ограниченности числа этих действий, что встречается в системах массового обслуживания, однако в ССМ маловероятно.

*Агрегатный способ организации квазипараллелизма* используется при наличии взаимодействий между функциональными действиями компонентов системы, для каждого компонента допустимо только ограниченное и заранее известное число состояний. Такое описание обычно пригодно для автоматных моделей. В принципе, агрегатный способ

организации квазипараллелизма в ИмМ достаточно удобен для описания сложной системы. Однако необходимость коммутации и обслуживания сигналов требует дополнительных затрат ресурсов машинного времени  $t'$ . За удобство описания и математическую строгость модели приходится расплачиваться дополнительным расходом  $t'$ , и это обстоятельство сдерживает использование указанного способа.

*Процессный способ организации квазипараллелизма* применим, когда все функциональные действия  $\Phi D_{ij}$  компонентов реальной системы различны. Условия появления событий  $C_{ij}$ , приводящие к выполнению  $\Phi D_{ij}$ , также индивидуальны. Каждому компоненту  $K_i$  нужна определенная последовательность выполнения  $\Phi D_{ij}$ . В любой момент времени в данном компоненте может выполняться только одно  $\Phi D_{ij}$ . При процессном подходе краткость описания активностей объединяется с эффективностью событийного представления имитации. Таким способом можно организовать имитацию любых сложных систем, но он особенно эффективен в случаях, когда требуется высокий уровень детализации выполнения  $\Phi D_{ij}$  при их аппроксимации с помощью  $АЛ_{ij}$ , и сама ИмМ используется для поиска узких мест в системе. При этой постановке задачи моделирования очень важно соблюдение сходства структуры модели и объекта исследования, что обеспечивается процессным способом имитации. Реальную систему удобнее всего имитировать процессным способом, когда в один и тот же момент времени не может реализоваться более одного  $\Phi D_{ij}$  данного  $i$ -го компонента реальной системы. Тогда исследователю удобнее рассматривать функционирование компонентов модели  $K_i$  как единое целое. Всю ИмМ можно представить в виде набора описаний процессов, каждое из которых описывает один класс процессов, причем допустимы информационные и управляющие связи не только между  $K_i$ , но даже между отдельными алгоритмами их функционирования. Поскольку такие требования к структуре ИмМ предъявляются в ССМ, в последней предпочтительно применять именно этот способ организации имитации, рассмотрим его подробнее.

#### *Принципы процессного способа организации квазипараллелизма*

На рисунке 1 представлена схема взаимодействия МУИ с моделью объекта, состоящей из описаний процессов. Алгоритм функционирования ИмМ формируется последовательным взаимодействием процессов и МУИ. В процессы объединяются связанные между собой активности, которые определяют функционирование одного и того же компонента модели  $K_i$ . Таким образом, имеет место полное соответствие компонентов реальной системы и ее ИмМ. Каждый компонент объекта моделирования имитируется своим процессом. Переход от выполнения одной активности к другой активности того же процесса считают изменением его состояния и называют активизацией процесса.

Обычно под состоянием процесса понимают номер ( $j$ ) той активности, которая входит в состав  $i$ -го процесса и на которую МУИ передает управление при свершении события  $C_{ij}$  в  $K_i$ . Изменения состояний объекта моделируются изменениями соответствующих состояний процессов и появлением событий  $C_{ij}$ .

Вся ИмМ представляет собой набор процессов, реализованных на некотором языке моделирования. Процессы связаны с МУИ с помощью определенных операторов этого языка, по которым происходит обращение к МУИ при завершении активности данного процесса, означающее переход процесса в другое состояние. Отметим, что проверка выполнимости условий активизации процесса и появления событий  $C_{ij}$  осуществляются самим процессом. Будучи активизированным, выполнение процесса (некоторой его активности) может начаться немедленно либо задержаться до появления определенных условий или до изменения состояний других процессов. Процессы могут переходить в новые состояния как по своей инициативе, так и в результате действий, выполняемых активностями других процессов.

В простейшем случае взаимодействия между активностями, из которых состоят процессы, нет, и все активности обращаются к МУИ с помощью операторов синхронизации WAIT( $\tau_{ij}$ ) [3].

Каждый такой оператор означает, что данному  $i$ -му процессу по окончании выполнения алгоритма  $АЛ_{ij}$  активности  $АК_{ij}$  назначается момент следующей активизации  $t_{ij}$  по окончании ожидания процесса в модельном времени длительностью  $\tau_{ij}$ . Началу выполнения  $АЛ_{ij}$  процессов соответствуют адреса  $a_{ij}$  в подпрограммах, реализующих выполнение активностей, которые объединены в процессы. МУИ работает с массивом состояний процессов (МС) и таблицей состояний процессов (ТС). В МС каждый элемент представляет собой пару значений  $(i, t_{ij})$ , где  $i$  — номер процесса;  $t_{ij}$  — момент  $j$ -й активизации процесса в будущем и появления события  $С_{ij}$ . Для выбора процессов, требующих активизации в момент  $t_0$ , МУИ использует ТС. Строки этой таблицы — списки параметров процессов. Так,  $i$ -й процесс описывает строка, в которой указаны:  $a_{ij}$  — адрес передачи управления на выполнение  $j$ -й активности в  $i$ -м процессе;  $t_{ож}$  — время, которое осталось  $i$ -му процессу находиться в состоянии ожидания, когда он останавливается другим процессом;  $\pi_i$  — приоритет  $i$ -го процесса, согласно которому осуществляется последовательное обслуживание двух одновременно активизируемых процессов.

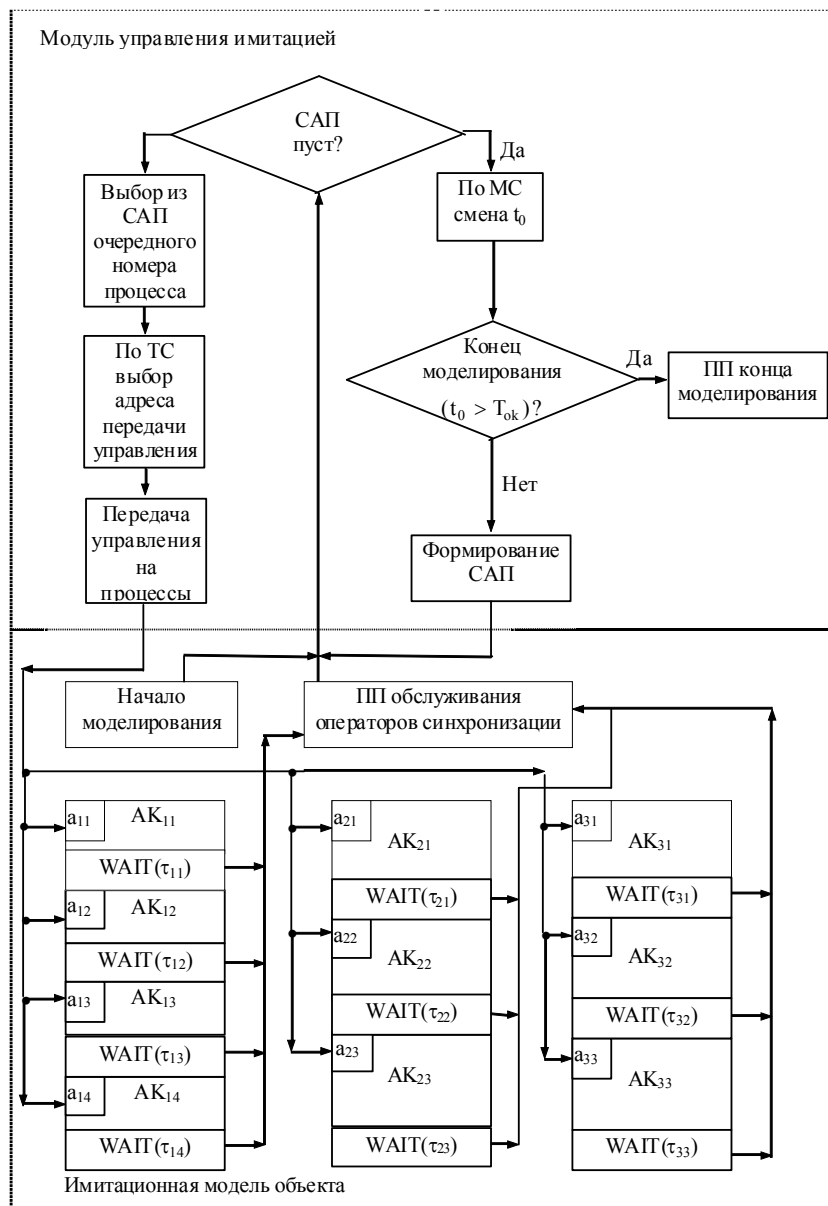


Рис. 1. Имитационная модель при процессном способе организации квазипараллелизма

Все элементы МС упорядочены по возрастанию значения  $t_{ij}$ . Если какой-либо  $i$ -й процесс остановлен (хотя бы даже для обслуживания его МУИ в моменты активизации), то время последующей его активизации в МС бесконечно велико ( $t_{ij} = \infty$ ) и соответствующий ему элемент находится в конце этого массива. Определено понятие “конфликтная ситуация в системе дискретных событий”: несколько событий  $C_{ij}$  в различных процессах происходят одновременно и требуют немедленного обслуживания со стороны МУИ. Это возможно, например, при наличии в МС нескольких элементов с одним и тем же значением  $t_{ij}$ . Учет конфликтных ситуаций производится с помощью списка одновременно активизируемых процессов (САП). В САП заносятся номера всех процессов, которые необходимо активизировать в одно и то же модельное время  $t_0$ . Запись номеров процессов  $i$  в САП и выбор их из этого списка МУИ осуществляет согласно приоритетам процессов  $\pi_i$ . Обслуживание МУИ очередного элемента САП состоит в передаче управления на выполнение алгоритма  $АЛ_{ij}$   $i$ -го процесса. Выполнение этого алгоритма продолжается до появления в нем очередного оператора синхронизации процесса  $WAIT(\tau_{ij})$ .

С помощью операторов ожидания типа  $WAIT(\tau_{ij})$  имитируется изменение временных координат активностей, входящих в состав  $i$ -го процесса.

Пусть задано время окончания моделирования  $T_{ок}$ , а условие окончания моделирования — достижение модельным временем  $t_0$  значения  $T_{ок}$ . МУИ обслуживает процессы согласно алгоритму, представленному ниже. Пусть в начальный момент моделирования  $t_0 = m_0$  список активизации процессов пуст и процессам назначены соответственно моменты активизации  $t_{11}, t_{21}, t_{31}$  в МС.

Шаг 1. Поскольку САП пуст, то осуществляется процедура смены  $t_0$ , представляющая собой выбор минимального значения из МС ( $t_0 = \min\{t_{ij}\}$ ).

Шаг 2. Формируется САП следующим образом. Все процессы, у которых  $t_{ij} \leq t_0$ , выбираются из МС и заносятся в САП согласно их приоритетам по ТС.

Шаг 3. Выбирается первый элемент САП, который необходимо активизировать в момент  $t_{ij} = t_0$ . По ТС определяется адрес  $a_{ij}$ , и управление от МУИ передается на выполнение алгоритма соответствующей активности. По окончании выполнения алгоритма активности появляется оператор ожидания  $i$ -го процесса следующей активизации  $WAIT(\tau_{ij})$ . В ходе реализации алгоритма активности  $AK_{ij}$  происходит вычисление или задание значения  $\tau_{ij}$  для операторов синхронизации процессов. Появления в алгоритме  $i$ -го процесса операторов синхронизации  $WAIT(\tau_{ij})$  возвращают управление МУИ, выполняющему следующие действия:

формирование нового элемента МС и занесение его в этот массив согласно значению  $t_{ij} = t_0 + \tau_{ij}$ ;

модификацию текущего состояния процесса и изменение адреса передачи управления  $a_{ij}$  для очередной активизации процесса  $i$  в ТС.

Шаг 4. Проверяется, исчерпан ли САП. Если в нем есть еще элементы, то МУИ переходит к шагу 2. Иначе выполняется шаг 5.

Шаг 5. Проверяется момент окончания моделирования ( $t_0 \geq T_{ок}$ ). Если это неравенство не выполняется, то имитация продолжается, начиная с шага 1. В противном случае управление передается программе окончания моделирования.

При процессном способе имитации однозначное соответствие между структурой модели и реальным объектом облегчает обозрение принятых предположений и упрощений, что важно в задачах моделирования открытых систем, когда в ходе проектирования или исследования объекта в модель приходится вносить частые изменения. Процессный способ имитации обладает хорошими изобразительными возможностями при многоуровневом и модульном подходе к моделированию систем. Эти преимущества возрастают по мере роста размеров модели.

### Организация имитационного моделирования в ССМ

Теперь покажем, какие параметры концептуальной модели предметной области (КМПО) в ССМ используются для создания возможности реализации имитационного режима изучения объекта моделирования.

При разработке ССМ сделано предположение о том, что программные модули и функции, имитирующие процессы КМПО, построены согласно принципам теории пространства состояний [6], т. е. задание значений векторов состояния и входных переменных (управлений) для каждого из  $s$  моментов времени  $t_v ::= t_i - hv$  ( $v ::= \overline{0, s}$ ,  $h > 0$  — шаг дискретности модели процесса во времени) назад от текущего значения локального времени данного процесса  $t_i$  обеспечивает вычисление значения вектора выходных переменных на этот момент времени.  $s ::= 0$  означает безынерционную модель процесса.

Для повышения общности допускается вводить управления на меньшем количестве шагов, чем  $s$ , формат описания динамики процессов КМПО совпадает с разностным уравнением состояния общего вида [7]:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f(x_k, x_{k-1}, \dots, x_{k-s}; u_{k+1}, u_k, \dots, u_{k-q+1}), \quad 0 \leq q \leq s, \\ y_{k+1} &= \Phi(x_{k+1}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x, y \subseteq \text{list\_out}(p_i)$ , причем  $x \cup y = \text{list\_out}(p_i)$ ,  $x \cap y = \emptyset$  — векторы (множества) элементов состояния и выходных переменных процесса  $p_i$ ;  $u \subseteq \text{list\_in}(p_i)$  — множество управляющих переменных;  $k$  — индекс момента дискретного времени;  $\text{list\_in}(p_i)$  и  $\text{list\_out}(p_i)$  — списки входных и выходных переменных процесса  $p_i$  соответственно.

Согласно (1), в алгоритмические спецификации (далее такие спецификации элементов КМПО названы фреймами) процессов КМПО при описании исполнителей процессов пользователем вводятся величины  $s$ ,  $q$  и  $h$ , упомянутые выше, а также признак типа аппроксимации, используемой для вычисления значений выходных переменных в промежуточные моменты времени. Для синхронизации изменений выходных переменных каждого процесса все они аппроксимируются однотипно. В исследовательской версии ССМ допускается аппроксимация сплайнами до 5-го порядка. Кроме того, перед началом имитационного режима во фреймы процессов заносятся приоритеты процессов (см. ниже), используемые для разрешения конфликтов при проведении имитации, а в ходе самой имитации — время будущей активизации данного процесса. Оно же связывается с текущими значениями выходных ресурсов процесса, которые хранятся во фреймах этих ресурсов. Здесь же хранится организованный в виде стека массив предшествующих значений ресурса, используемых для аппроксимации. Размерность этого массива зависит от типа аппроксимации. Для внешних данных и ресурсов, задаваемых по сценарию, тип аппроксимации и шаг дискретности во времени вводятся во фреймы ресурсов вручную.

При экстраполяции поведения объекта в рамках того или иного сценария фиксируется исследуемый фрагмент КМПО, и при необходимости исключаются содержащиеся в нем альтернативы, которые пользователь не считает целесообразным анализировать. Соответственно, эти альтернативы исключаются из процедур классификации ситуаций. Кроме того, задается интервал имитации (начальный и конечный моменты модельного времени  $t_0$ ). В ходе имитации основную роль играют процессы КМПО, поскольку именно их исполнители (а также экспертная система — ЭС ССМ, если она является исполнителем каких-либо процессов и/или ресурсов изучаемого фрагмента модели) производят вычисления значений ресурсов в динамике.

Диаграмма перехода состояний (STD) для процессов КМПО приведена на рис. 2 ниже. Она соответствует обоснованному ранее процессному способу организации имитационного режима изучения фрагмента модели с учетом структуры КМПО ССМ.

В любой заданный момент модельного времени  $t_0$  некоторый процесс  $p_i$  может находиться в одном из пяти показанных на рисунке состояний: активен, пассивен, отложен, блокирован либо находится в списке активизируемых процессов (САП).

Процесс  $p_i$  пассивен, если хранящееся в его фрейме время будущей активизации  $t_{ij} > t_0$ . Процесс заносится в список активизируемых процессов, если  $t_{ij} \leq t_0$ . Его место в списке определяется приоритетом процесса, рассчитанным при анализе разрешимости исследуемого фрагмента (см. ниже). При записи процесса в список активизируемых проверяется готовность

всех его входных ресурсов по условию: время вычисления их текущих значений должно быть не меньше  $t_0$ . Если это условие нарушено хотя бы для одного из входных ресурсов данного процесса, он помечается как отложенный. Когда процесс поднимается в первую строку списка активизируемых процессов, то, если он отложен, проверяется готовность всех процессов, входящих во множество порождающих его процессов: время их будущей активизации должно быть не меньше  $t_0$ . Если это условие выполнено, то процесс переводится в состояние «активен», в противном случае он переходит в состояние «блокирован», что интерпретируется как сигнал неисправности, поскольку при правильной расстановке приоритетов и корректности КМПО этого быть не должно. Теперь изложим алгоритм расстановки приоритетов.

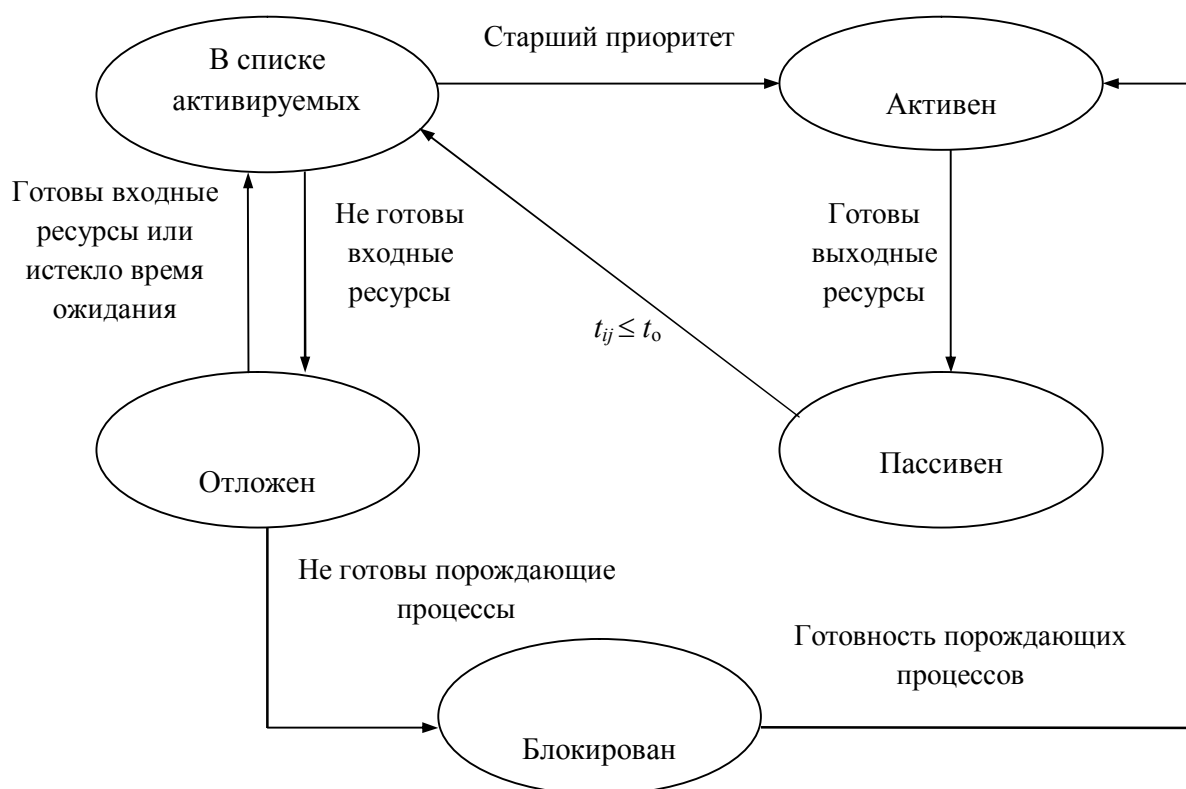


Рис. 2. STD процесса CCM

*Расстановка приоритетов процессов имитируемого фрагмента*

Как отмечено ранее, перед исследованием фрагмента модели в динамическом режиме необходимо определить порядок вызовов исполнителей процессов, участвующих в реализации этого фрагмента, т. е. внести в их фреймы приоритеты  $\pi_i$ , которые используются при определении порядка обслуживания одновременно активизируемых процессов ИмМ ССМ. Для этого применяется алгоритм, описанный в [5].

Идея алгоритма расстановки приоритетов  $\pi_i$  процессов  $p_i$  некоторого фрагмента модели ССМ состоит в присвоении старших приоритетов процессам более низких уровней декомпозиции (согласно принципу приоритета действий [8] процессы более высоких уровней получают информацию с нарастающим запаздыванием). В пределах уровня старший приоритет получают процессы, потребляющие только внешние (по отношению к изучаемому фрагменту) ресурсы, а процессы, потребляющие выходные ресурсы некоторого процесса, получают меньший приоритет, чем этот процесс. Если между несколькими процессами имеет место цикл по ресурсам, то старший приоритет получает процесс с бóльшим шагом дискретности по времени. При работе алгоритма используются результаты разметки циклов, выполняемые при контроле ацикличности модели [5], т. е. считается, что все процессы, входящие в какой-либо



цикл, имеют пометку в виде номера этого цикла. Как уже отмечалось, в имитационном режиме работы ССМ реализуется способ шага до следующего события (событийное планирование имитации) и процессный способ организации квазипараллелизма.

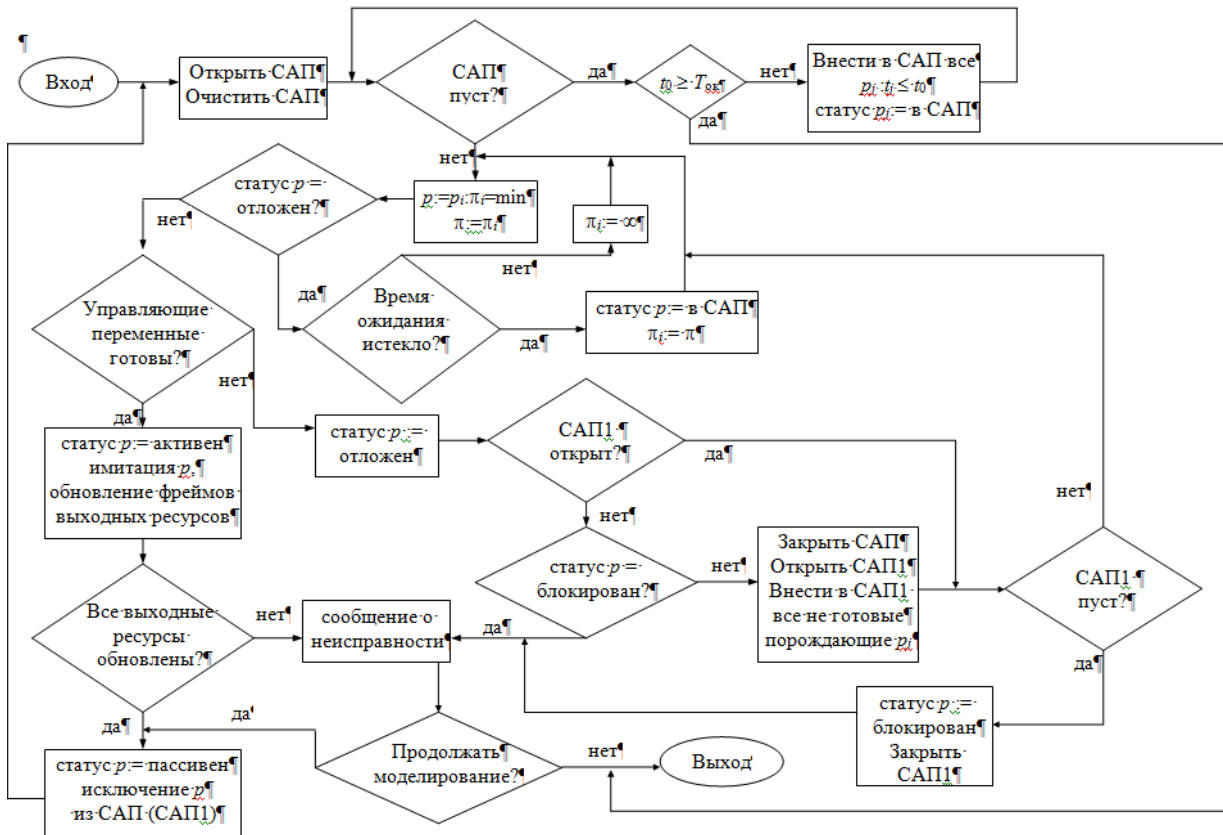


Рис. 3. Схема работы ИмМ ССМ

Схема имитационной модели ССМ приведена на рис. 3.

Отличие в организации работы ИмМ ССМ от схемы, представленной на рис. 1, состоит в том, что при неготовности входных ресурсов для запуска некоторого процесса делается попытка запустить порождающие их процессы, для чего формируется новый список активизируемых процессов, и только при невозможности сделать это имитация приостанавливается до получения указаний пользователя.

По сравнению с «обычными» исполнителями процессов при использовании ЭС ССМ для исполнения процессов и/или ресурсов КМПО имеются некоторые отличия в организации имитационного режима. Они заключаются в следующем. Если ЭС назначена исполнителем некоторого ресурса, то она запускается, когда этот ресурс нужен для запуска процесса, где он является входным, а момент времени, на который было вычислено текущее значение ресурса, меньше модельного времени (выход «Нет» блока проверки «Управляющие переменные готовы?» на схеме ИмМ). При этом данный ресурс указывается в качестве цели экспертизы. По завершению экспертизы новому значению ресурса присваивается время вычисления, равное минимальному времени вычисления листовых ресурсов, использованных в ходе экспертизы. Если же ЭС назначена исполнителем некоторого процесса КМПО, то все его входные ресурсы должны быть в наборе листовых данных ЭС, а все его выходные ресурсы — вычисляться в ходе экспертизы. Запуск ЭС в таком случае производится по результатам анализа приоритетов, как и запуск других процессов КМПО, и всем вычисленным выходным ресурсам процесса время назначается так же, как и при исполнении ресурса. В качестве цели экспертизы назначается

любой выходной ресурс исполняемого процесса, а по окончании экспертизы производится проверка, вычислены ли новые значения всех выходных ресурсов данного процесса, в противном случае выдается сообщение о неисправности. Если по ходу экспертизы (как при исполнении ресурса, так и при исполнении процесса) кроме требуемых ресурсов вычисляются значения еще каких-либо ресурсов фрагмента, эти значения также заносятся во фреймы соответствующих ресурсов с тем же значением времени.

Процедура имитации каждого процесса в общем случае включает следующие стадии.

1. Подготовка данных для имитации — состоит в формировании массивов векторов состояния и управлений, необходимых для срабатывания процесса (см. равенства (1)). Для этого используются области памяти со стековой организацией, в которые из БД переписываются значения переменных состояния и управления данного процесса для требуемых моментов времени.

2. Запуск исполняемого модуля (с предварительной компиляцией, если это требуется для заданного типа исполнителя).

3. Запись новых значений выходных ресурсов в соответствующие фреймы ресурсов и сдвиг информации в стеках векторов состояния процесса.

Эта процедура также имеет особенности, если исполнителем является ЭС ССМ, когда требуется реализовать правила, содержащие пространственно-временные функции (ПВФ) [5]. В подобных случаях между шагами 2 и 3 имитации процесса могут добавляться обращения ЭС к базам исходных данных, БД КМПО и/или ГИС для получения необходимой информации. Для сложных запросов таких обращений может быть несколько. Они реализуются средствами языка SQL, что повышает мобильность системы.

Примеры применения предложенного способа организации имитационного моделирования в настоящей работе не приводятся из-за большого объема их описания. Описания некоторых приложений имеются в [5, 9, 10].

## Заключение

Показано, что для систем имитационного моделирования сложных пространственных динамических объектов типа ППК, когда модель объекта подвергается оперативной модификации в процессе моделирования, предпочтительно событийное планирование имитации с применением процессного способа организации квазипараллелизма. Отличие такого способа выполнения имитации состоит в том, что при неготовности входных ресурсов для запуска некоторого процесса делается попытка запустить порождающие их процессы, для чего формируется новый список активизируемых процессов, и только при невозможности сделать это имитация приостанавливается до получения указаний пользователя. В практическом аспекте это позволяет повысить корректность выполнения имитационного эксперимента при изменениях концептуальной модели ППК.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Таха Х. А. Глава 18. Имитационное моделирование // Введение в исследование операций — Operations Research: An Introduction. 7-е изд. М.: «Вильямс», 2007. С. 697–737.
2. Строгалев В. П., Толкачева И. О. Имитационное моделирование. М.: МГТУ им. Баумана, 2008. С. 697–737.
3. Максимей И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1988. 232 с.
4. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем. Искусство и наука. М.: Мир, 1978. 417 с.
5. Фридман А. Я. Ситуационное управление структурой промышленно-природных систем. Методы и модели. Саарбрюккен: LAMBERT Academic Publishing, 2015. 530 с.
6. Деруссо П., Рой Р., Клоуз М. Пространство состояний в теории управления. М.: Наука, 1970. 620 с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1987. 832 с.
8. Месарович М., Мако Д., Такахага И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
9. Программно-алгоритмическая организация системы ситуационного управления промышленно-природными комплексами / С. А. Бойков [и др.] // Труды ИСА РАН. Прикладные проблемы управления макросистемами (Апатиты, 5–9 апреля 2004 г.): сб. докл. Т. 8. М.: Едиториал УРСС, 2004. С. 199–210.
10. Ситуационное моделирование промышленно-природных комплексов на основе концептуального подхода / А. А. Зуенко [и др.]. // История науки и техники. 2014. № 1. С. 53–68.

**Сведения об авторе**

*Фридман Александр Яковлевич* — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник  
Институт информатики и математического моделирования КНЦ РАН  
E-mail: [fridman@iimm.ru](mailto:fridman@iimm.ru)

**Author Affiliation**

*Alexander Ya. Fridman* — Dr. Sci. (Engineering), Leading Researcher of the Institute for Informatics and Mathematical Modelling of the KSC of the RAS  
E-mail: [fridman@iimm.ru](mailto:fridman@iimm.ru)

**Библиографическое описание статьи**

*Фридман, А. Я.* Организация имитационного моделирования промышленно-природных комплексов / *А. Я. Фридман* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 3 (26). — С. 126–138.

**Reference**

*Fridman Alexander Ya.* Planning of Simulation for Industry-Natural Complexes. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 3 (26), pp. 126–138. (In Russ.).

**VI Всероссийская научная конференция с международным участием  
«Экологические проблемы северных регионов и пути их решения»**

*Институт проблем промышленной экологии севера КНЦ РАН, 10–14 октября 2016 г.*

На конференции рассмотрен широкий круг проблем по следующим тематическим разделам.

1. Природная и антропогенная динамика тундровых и лесных экосистем, сохранение биоразнообразия. Современные подходы и технологии в природоохранной деятельности.
2. Современные тенденции изменения водных экосистем Севера.
3. Геохимия природных сред, моделирование природных процессов и технологические аспекты охраны окружающей среды.
4. Человек в условиях Крайнего Севера: социально-экономические и медицинские аспекты.

В докладах было уделено внимание антропогенной и природной динамике тундровых и лесных экосистем, сохранению биоразнообразия, современным тенденциям изменения водных экосистем Севера, геохимии природных сред, моделированию природных процессов и технологическим аспектам охраны окружающей среды, влиянию природных и социально-экономических условий на здоровье человека в районах Крайнего Севера, а также развитию современных подходов и ресурсосберегающих технологий в природоохранной деятельности.

В работе конференции приняли участие представители 46 исследовательских институтов, вузов, заповедников и организаций из 13 городов России и 2 городов Финляндии. Среди участников конференции — коллеги из профильных институтов Москвы, Санкт-Петербурга, Петрозаводска, Сыктывкара, Томска, Пущино, Кировска, Мончегорска, пос. Раякоски, г. Колари и Турку (Финляндия).

Общее число участников конференции — 98 чел., из них 29 студентов. Сотрудников ИППЭС КНЦ РАН — 42 чел., российских ученых, не являющихся работниками ИППЭС КНЦ РАН, — 24 чел., зарубежных ученых — 2 чел.

Заслушано 73 устных и представлено 6 стендовых докладов.

Принято решение: VII Всероссийскую научную конференцию с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения» провести в г. Апатиты в 2019 г.

**Международная научная школа-конференция****«Цианопрокариоты (цианобактерии): систематика, экология, распространение»**

*Институт проблем промышленной экологии севера КНЦ РАН, 5–9 сентября 2016 г.*

Кольский научный центр РАН, Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (ИППЭС), Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН и Мурманское отделение Русского ботанического общества (МО РБО) при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований провели в г. Апатиты Мурманской обл. с 5 по 9 сентября 2016 г. международную научную Школу-конференцию «Цианопрокариоты (цианобактерии): систематика, экология, распространение».

Участники совещания обсудили широкий круг вопросов, связанных с изучением систематики прокариот, экологии и географического распространения представителей этой группы. Были рассмотрены различные аспекты, связанные с «цветением» водоемов. Уделено внимание методам сбора, культивирования и идентификации цианопрокариот.

Непосредственно в работе школы-конференции приняли участие 30 специалистов.

Сотрудниками ИППЭС было сделано три устных доклада.

В рамках школы-конференции проведен круглый стол, на котором обсуждались вопросы изменений в систематике цианопрокариот, базы данных по биоразнообразию цианопрокариот, вопросы экологии.

Проведенное мероприятие в виде заслушанных устных докладов и состоявшихся дискуссий способствовало: консолидации усилий ученых разных специальностей (альгологов, микробиологов, генетиков, молекулярных биологов, физиологов), занимающихся различными аспектами изучения цианопрокариот; созданию внутривосточной платформы — площадки для проведения дискуссий и взаимодействия российских ученых с ведущими международными коллегами, занимающимися

изучением цианопротокариот; широкому обсуждению современных международных достижений в области изучения цианопротокариот; передаче основных теоретических и практических навыков, приемов и методов работы от ведущих специалистов к начинающим исследователям — аспирантам и студентам.

Важной частью школы-конференции стали три полевые экскурсии, на которых были продемонстрированы методы сбора образцов, фиксации экологических параметров местообитаний, измерение газообмена, азотфиксации в природных популяциях в условиях Хибинских гор. На специально организованной микроскопной сессии проведены практические семинары, посвященные современным методам микроскопии и морфологической идентификации видов.

Все секционные заседания были оснащены соответствующей оргтехникой, микроскопная сессия была обеспечена современными микроскопами и биноклями.

### **Международная школа-конференция молодых ученых «Климат и эколого-географические проблемы Российской Арктики»**

*Институт проблем промышленной экологии севера КНЦ РАН, 4–10 сентября 2016 г.*

Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН совместно с ФГБУН Институтом географии РАН, Географическим факультетом МГУ им. М. В. Ломоносова, ФГБУН Институтом физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН провели в г. Апатиты международную школу-конференцию молодых ученых. Финансовую поддержку мероприятия оказали: Русское географическое общество (грант РГО 34/2016-Р), Российский научный фонд (проект № 14-47-00049 «Влияние антропогенных и естественных эмиссий парниковых и загрязняющих примесей на климатические и экосистемные изменения в Евразии»), а также технологическая платформа «Технологии экологического развития»; Российский фонд фундаментальных исследований (грант № 15-55-71004) и ИКЗ СО РАН: The Belmont Forum Project HIARC «Anthropogenic Heat Islands in the Arctic: Windows of the Future of the Regional Climates, Ecosystems, and Societies».

В рамках школы-конференции состоялись лекции ведущих ученых и доклады молодых специалистов в области исследования биологии, экологии, географии, палеогеографии, климатологии и океанологии полярных районов России.

На конференции был рассмотрен широкий круг проблем по следующим направлениям:

- 1) эволюция и современная динамика наземных и морских экосистем Арктики;
- 2) современное состояние и возможные изменения климатической системы Арктики;
- 3) история изучения и освоения Российской Арктики;
- 4) эколого-экономические и социальные проблемы Арктики;
- 5) перспективы развития Арктического региона в условиях изменения климата.

Тематика конференции была посвящена изучению природы, проблемам освоения и сохранения Арктики, перспективам развития Арктического региона, весьма актуальным в настоящее время как с фундаментально-научной стороны, так и с чисто практической. Оценивалось качество состояния и эволюции экосистем Арктики, рассматривались вопросы их сохранения и устойчивого развития, а также социально-экономические проблемы освоения богатейших природных ресурсов Северной Евразии.

В работе конференции приняли участие представители 15 исследовательских институтов, вузов и организаций из 7 городов России.

В конференции приняли участие 75 человек, среди них сотрудники ИППЭС КНЦ РАН (4 человека), представители других городов России (69 человек), а также 1 зарубежный ученый.

Были заслушаны 12 лекций ученых из ведущих институтов и университетов гг. Москвы, Рязани, Апатитов и 45 устных докладов молодых ученых. Проведен круглый стол «Введение в наукометрию» для молодых специалистов.

Проведенное мероприятие в виде заслушанных лекций, докладов и состоявшихся дискуссий способствовало выявлению новых тенденций по изменению климата Арктического региона, оценке реакций и адаптационных механизмов живых организмов при различных сценариях климатических изменений и техногенных нагрузок в Арктике. Российские ученые в последние годы увеличили свое внимание к Арктике как региону, имеющему важное стратегическое и ресурсное значение.

Успешное проведение данной конференции базируется на наличии кадров высокой квалификации в организациях, участвующих в подготовке данного мероприятия. Руководство секциями успешно осуществляли молодые ученые — кандидаты географических, технических, биологических наук. Лекторы — доктора географических и технических наук — являлись катализаторами научных дискуссий, вовлекающими в них молодежь. Все заседания были оснащены соответствующей оргтехникой.

Была учтена многоплановость и комплексность эколого-географических исследований в обеспечении устойчивого развития Арктики.

**XXXIV Конференция молодых ученых Мурманского морского биологического института КНЦ РАН, посвященная 50-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова «Перспективные направления исследований экосистем арктических и южных морей России» Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, 13 мая 2016 г.**

В 2016 г. традиционная конференция молодых ученых ММБИ прошла в формате отчетной сессии молодых ученых в рамках XIV Международной конференции студентов и аспирантов «Проблемы Арктического региона». В программе научного мероприятия было заявлено 22 доклада, в мероприятии приняли участие 58 человек. На сессии было заслушано и обсуждено 12 докладов молодых ученых и аспирантов ММБИ.

Конференция открылась вступительным словом П. Р. Макаревича, который подчеркнул важность и значимость данного традиционного мероприятия Института как ежегодного тренинга и «курсов повышения квалификации» для научной молодежи. П. Р. Макаревич также упомянул, что данное мероприятие посвящено памяти талантливого океанолога, директора Азовского филиала ММБИ члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова, безвременно ушедшего в 2015 г. Сессия открылась пленарным докладом Д. В. Моисеева (содокладчик — С. Л. Дженюк), посвященным деятельности Д. Г. Матишова как океанолога, его вкладу в мировые знания о природе арктических и южных морей России. Докладчик отметил, что для молодого поколения исследователей Д. Г. Матишов стал примером современного ученого-океанолога, одинаково уверенно чувствующего себя на палубе экспедиционного судна, у компьютера за рабочим столом или на трибуне международного конгресса.

Сообщения молодых ученых базировались на современных данных, полученных в ходе выполнения экспедиционных и экспериментальных исследований в Баренцевом, Карском морях и на арх. Шпицберген. Большой блок экспериментальных работ был посвящен изучению морфологических и поведенческих адаптаций морских млекопитающих. Часть работ традиционно носило экологический характер и ставило своей целью изучение биологии отдельных звеньев морских экосистем. Особый интерес был проявлен слушателями к докладу «Микробиологические исследования Карского моря», в ходе которого были доложены пионерские данные по экологии сообществ планктонных бактерий и вирусов. Широкую дискуссию вызвал доклад «Результаты реализации ВЕБ-ГИС-решений по картам уязвимости и чувствительности Кольского залива», посвященный практической реализации многолетних наработок лаборатории инженерной экологии в области построения экологических карт Баренцева моря и размещения их на различных интернет-порталах.

Выступающие в дискуссии члены ученого совета ММБИ с удовлетворением отметили, что на научном мероприятии были представлены доклады, охватывающие все фундаментальные и прикладные направления работ заполярной морской биологии и океанографии. Все докладчики выдержали достойный научный уровень, продемонстрировали умение поставить задачу в исследовании и найти оптимальные способы ее решения. Выступающие не раз подчеркивали, что в подобных ежегодных отчетных сессиях молодых ученых прослеживается динамика развития научных направлений лабораторий. Ведущие ученые в своих выступлениях отмечали наиболее понравившиеся доклады как зрелых ученых — В. Г. Дворецкого и Т. В. Минзюк, так и молодых специалистов — М. А. Павловой, И. А. Пастухова. К началу научного мероприятия были изданы материалы конференции.

По итогам творческого конкурса, проводимого среди сотрудников ММБИ, победителями стали: М. А. Павлова, Т. В. Минзюк, М. В. Пахомов и П. С. Ващенко.

**X Межрегиональная научно-техническая конференция молодых ученых, специалистов и студентов вузов «Научно-практические проблемы в области химии и химических технологий»**

***Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, 20–22 апреля 2016 г.***

На базе Института химии КНЦ РАН состоялась X Межрегиональная научно-техническая конференция молодых ученых, специалистов и студентов вузов «Научно-практические проблемы в области химии и химических технологий». Присутствовали порядка 110 представителей ИХТРЭМС КНЦ РАН, Мурманского государственного технического университета, в том числе студенты кафедры химии и строительного материаловедения Апатитского филиала МГТУ, а также иногородние участники.

За время работы конференции заслушано 2 пленарных и 28 устных докладов, представлено 6 стендовых докладов. 10 молодых ученых приняли заочное участие.

В работах представлены результаты исследований молодых ученых по разработке подходов к комплексной переработке сложного полиметаллического минерального сырья, а также техногенных отходов пиро- и гидрометаллургическими методами, синтезу, изучению свойств функциональных материалов; рассмотрены вопросы сорбции и экстракции цветных, редких и благородных металлов с использованием современных сорбентов и экстрагентов; освещены проблемы производства стройматериалов на основе природного и техногенного сырья Мурманской области, предложены пути их решения. Представленные результаты могут быть использованы для дальнейшего развития комплексных исследований в разработке малоотходных экономически эффективных и экологически безопасных процессов переработки сложного сырья с получением чистых соединений и новых современных материалов.

**Научно-практические проблемы в области химии и химических технологий:** материалы X Межрегиональной научно-технической конференции молодых ученых, специалистов и студентов вузов (Апатиты, 20–22 апреля 2016 г.). — Апатиты: КНЦ РАН, 2016. — 150 с.

Сборник содержит доклады научно-практической конференции, посвященные изучению актуальных проблем переработки и применения минерального сырья Кольского п-ова. Представленные доклады включают результаты исследований по разработке научных основ переработки комплексного сырья и техногенных отходов гидро- и пирометаллургическими методами, синтезу, изучению свойств и применению новых функциональных материалов. Рассмотрены вопросы сорбции и экстракции цветных и редких металлов с использованием различных типов сорбентов и экстрагентов.

В работах молодых ученых широко раскрывается проблематика производства стройматериалов в Мурманской обл., предложены некоторые пути решения с использованием техногенных отходов.

**Север и рынок: формирование экономического порядка:** научно-информационный журнал / учредитель Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина Кольского научного центра РАН. — Апатиты: КНЦ РАН, 2016 — . — 2016. — ISBN 2220-802X. 2016. — № 1 (48). — 143 с.

**Труды КНЦ РАН.** — Апатиты: КНЦ РАН, 2016. — Вып. 2 (36). — 283 с. (Океанология; вып. 3).

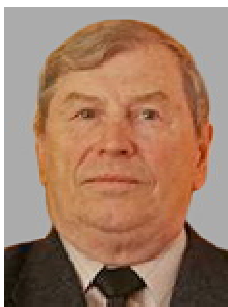
**Финансовое обеспечение развития северных регионов:** коллектив. монография / под науч. ред. Г. В. Кобылинской. — Апатиты: КНЦ РАН, 2016. — 193 с.

В коллективной монографии рассматриваются процессы формирования, распределения и использования финансовых ресурсов в целях регионального развития северных территорий. Исследуются теоретические основы организации финансовых потоков с концентрацией внимания на оценке финансового потенциала, определяются налогово-бюджетные инструменты и механизмы с оценкой их воздействия на региональное развитие, выявляются структурные особенности инвестиционных процессов в регионах Севера. Оценивается влияние корпоративного управления на финансовое обеспечение северных территорий. Выявляются факторы, определяющие направления движения капитала, оцениваются последствия функционирования северной экономики в условиях глобализации.

Работа рассчитана на широкий круг специалистов, включая научных работников и преподавателей, государственных и муниципальных служащих.



80



### **ВАСИЛЬЕВ Анатолий Михайлович**

д. э. н., профессор, заслуженный экономист РФ, в Институте экономических проблем КНЦ РАН с 1990 г.

В период 1992–2003 гг. — заместитель директора «Арктикцентра» (Мурманский научно-исследовательский и консультативный центр по изучению социально-экономических проблем Арктического региона), в 2004–2015 гг. — руководитель отдела «Экономика морской деятельности в Арктике» (подразделение института в г. Мурманске), в настоящее время — главный научный сотрудник Отдела. Является членом Ученого совета института (с 1991 г.), входил в состав Диссертационного совета по защите кандидатских диссертаций в период его действия (2000–2014 гг.), награжден почетными грамотами губернатора Мурманской области и Мурманской областной думы.

Анатолий Михайлович — научный руководитель и ответственный исполнитель тематических научно-исследовательских работ, выполняемых в Отделе по направлениям (последнее десятилетие): «Экономическое обоснование стратегии морской деятельности России в Арктике», «Концептуальные направления инновационного развития морехозяйственного комплекса Европейского Севера России», «Научные и прикладные основы государственной политики функционирования ресурсно-сырьевой экономики на шельфе и в прибрежной зоне Российской Арктики в условиях глобализации».

Руководил выполнением многих научных исследований по заказу организаций рыбного хозяйства Мурманской области. Из последних работ можно назвать: «Значение институциональных нововведений в развитии рыболовства на Северном бассейне» (2013 г.), «Общее море, общие задачи. Сравнительный анализ рамочных условий рыбной отрасли России и Норвегии» (2015 г.).

Результаты исследований опубликованы более чем в 150 научных статьях, в том числе в 6 монографиях.

В качестве консультанта и специалиста совместно с сотрудниками Администрации Мурманской области, руководителями НО (ассоциативных профессиональных объединений) осуществляет аналитическую оценку состояния рыбной отрасли, в том числе в рамках утвержденной прогнозной концепции развития Мурманской области до 2015 г., принимает



*Юбилеи*



Юбилеи

участие в разработке итоговых и нормативных правовых документов.

Является членом экспертного совета Рабочей группы по совершенствованию законодательства о рыболовстве и сохранении водных биоресурсов, созданной при Министерстве сельского хозяйства Российской Федерации. Анатолий Михайлович входит в состав Объединенного совета при Министерстве сельского хозяйства и Комитете по ветеринарии Мурманской области, Межведомственной комиссии при Администрации Мурманской области по мониторингу достижения показателей, определенных в указах Президента Российской Федерации от 07.05.2012 г.

А. М. Васильев — член и председатель государственных аттестационных комиссий филиалов высших учебных заведений, расположенных в г. Мурманск, Мурманского государственного технического университета.

Поздравляем Анатолия Михайловича со славным юбилеем и желаем крепкого здоровья, творческих успехов, удачи во всех начинаниях!

70



**МИНИН Валерий Андреевич**

к. т. н. (1986 г.), старший научный сотрудник, заведующий лабораторией энергосбережения и возобновляемых источников энергии ЦФТПЭС КНЦ РАН (с 1996 г.). В Центре физико-технических проблем энергетики севера КНЦ РАН с 1971 г.

Специалист в области исследования проблем электро- и теплоснабжения районов Севера с привлечением нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Главное направление его научной деятельности — ветроэнергетика. При его участии на побережье Баренцева моря был организован и получил развитие ветроэнергетический полигон, где на протяжении 20 лет проводились экспериментальные исследования и разрабатывались практические рекомендации по рациональному использованию ветроэнергетических установок в условиях Севера. Принимал участие в разработке ветроэнергетического кадастра Европейского Севера России. В 1996–1997 годах — координатор международного проекта «Кольский ветер» с российской стороны. При его участии выявлен район на северном побережье Кольского п-ва, перспективный для развития системной ветроэнергетики, предложены площадки для размещения ветропарков мощностью от 10–15 до 200 МВт.

Под его руководством выполнена оценка потенциала энергосбережения в сфере теплоснабжения потребителей Мурманской области, показаны основные направления его эффективного использования, в том числе вовлечение в оборот нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Разработана математическая модель схемы теплоснабжения потребителей Крайнего Севера и Арктики, расположенных в районах с повышенным потенциалом ветра, включающая источники на органическом топливе, ветроэнергетические установки и аккумуляторы тепловой энергии и позволяющая отслеживать режимы работы такой комплексной схемы теплоснабжения в зависимости от различных климатических данных.

За разработки в области ветроэнергетики награжден Почетной грамотой РАН (1999 г.). За комплекс исследований в области ветроэнергетики награжден бронзовыми медалями ВДНХ и ВВЦ (1980 г.).

Валерий Андреевич — член Ученого совета ЦФТПЭС и 12 лет был ученым секретарем данного совета, член Ученого совета Общего собрания ученых КНЦ РАН. Преподавал в АФ МГТУ и КФ ПетрГУ, возглавлял кафедру прикладной механики и инженерной графики. Является автором более 200 научных трудов, опубликованных в отечественных и зарубежных изданиях, в том числе 8 монографий.

Поздравляем Валерия Андреевича с юбилеем и желаем крепкого здоровья, неугасаемой энергии, успешного претворения в жизнь научных идей!



#### **СЕЛИН Владимир Степанович**

д. э. н., главный научный сотрудник, заслуженный экономист Российской Федерации, профессор. В Институте экономических проблем КНЦ РАН с 1986 г.

Окончил Ленинградский горный институт (1970) по специальности горный инженер-экономист. После службы в армии с 1972 г. работал в аппарате Кольского научного центра РАН экономистом, начальником планово-финансового отдела. В ИЭП КНЦ РАН с 1986 г. — старший научный сотрудник, заведующий отделом, заместитель директора по науке, директор института (2000–2004). С 2004 по 2007 гг. на постоянной основе работал в Мурманской областной думе. С 2007 г. — главный научный сотрудник ИЭП КНЦ РАН, руководитель отдела экономической политики в Арктике.

Сфера научных интересов — региональная экономика, экономический анализ и прогнозирование, организация и управление народным хозяйством; экономика инноваций. Научные результаты: обоснована роль государства и формы экономической поддержки развития северных регионов, рассмотрены направления социально-экономической политики и методические подходы к реформированию системы гарантий



*Юбилей*



Юбилеи

и компенсаций в условиях рыночной экономики. Исследованы динамика грузопотоков, состояние морского транспорта и инфраструктуры на трассе Северного морского пути (СМП) и вопросы транспортной достаточности в Арктической зоне России. Обоснованы организационно-экономические и нормативно-правовые мероприятия, обеспечивающие устойчивое функционирование СМП. В сфере микроэкономики раскрыты особенности управления трудом и производительностью на предприятии, роль различных субъектов, включая государство, в регулировании трудовых отношений. Исследованы современные тенденции в организации и оплате труда в развитых странах, в том числе с позиций корпоративных отношений. Автор и соавтор более 250 опубликованных научных работ, в том числе 30 монографий. В научных трудах рассматриваются основные проблемы и особенности системной трансформации в экономике Севера России, исследуются переходные тенденции в хозяйственных системах, дана оценка стратегического ресурсного и производственного потенциала, экспортной динамики и конкурентоспособности. Член общего собрания ученых (с 1999), Президиума КНЦ РАН, Ученого совета Института. Председатель диссертационного совета ИЭП КНЦ РАН, заместитель председателя диссертационного совета Вологодского технического университета (2001–2005), член диссертационного совета МГТУ. Член экспертного совета ВАК Минобрнауки РФ по экономическим наукам (2002–2005). Участник рабочих групп Верховного Совета РФ и Государственного комитета РФ по вопросам развития Севера при подготовке федеральных законов «О гарантиях и компенсациях для лиц, работающих и проживающих в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностях», «О государственном регулировании Севера Российской Федерации». Член экспертной группы при Комитете по делам Севера и коренных малочисленных народностей Совета Федерации РФ (2001–2004). Председатель экспертного совета Российского фонда фундаментальных исследований в Мурманской области, член Научного совета по проблемам энергетики и транспорта Северо-Запада при РАН, член научно-издательского совета Кольской энциклопедии. Действительный член Международной академии регионального развития и сотрудничества (2001), член-корреспондент Международной академии экологии и безопасности жизнедеятельности (1995). Профессор, заведующий кафедрой финансов и бухгалтерского учета КФ ПетрГУ (1996–1998), заведующий кафедрой экономической теории АФ СПбТИЭУ (2000–2005), профессор кафедры менеджмента и маркетинга МГТУ (с 2005).

Награжден медалями: «300 лет Российского флота» (2002), «В память 300-летия Санкт-Петербурга» (2004), Почетной грамотой губернатора Мурманской области (2000), Почетной грамотой Мурманской областной думы (2006), Благодарственным письмом главы города Апатиты (2010). Депутат Мурманского областного совета народных депутатов (1992–1993), депутат Мурманской областной думы (200–2007). Председатель Фонда имущества г. Апатиты (1992–1994), член совета директоров ОАО «Апатит» (2002–2009).

Неутомимая борьба В. С. Селина за воплощение в жизнь достижений академической науки полностью отвечает заветам основателя Кольского научного центра академика Александра Ферсмана, поэтому Президиум КНЦ РАН с признательностью за вклад в укрепление роли науки в обществе награждает высшей наградой КНЦ РАН — Почетным дипломом имени А. Е. Ферсмана.

Поздравляем Владимира Степановича с юбилеем и желаем крепкого здоровья, личного счастья и новых творческих успехов на благо России!

65



### **ХРАПОВ Владимир Евгеньевич**

д. э. н., работает в Институте экономических проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН с 12 ноября 2008 г. по настоящее время в должности главного научного сотрудника Отдела экономики морской деятельности в Арктике.

Окончил в 1973 г. Астраханский технический институт рыбной промышленности и хозяйства по специальности «Судовые силовые установки»; в 1990 г. — Академию народного хозяйства при Совете министров; в 2012 г. закончил обучение в НОУ ВПО «Мурманская академия экономики и управления» по образовательной программе «Мастер делового администрирования — Master of Business Administration (MBA)». В 1992 г. защитил диссертацию на присвоение ученой степени кандидата экономических наук, в 2006 г. присуждена ученая степень доктора экономических наук. В 2002 г. избран академиком Международной академии реальной экономики. В 1995 г. присвоено ученое звание доцента.

До прихода в наш институт Владимир Евгеньевич работал на производственном объединении судоремонтных предприятий «Мурманская судверфь». На каждой должности он отличался дисциплиной, работоспособностью, тягой к знаниям и стремлением к улучшению производственной деятельности подведомственному ему производственному подразделению, будь то участок, цех, завод или объединение в целом.

Наработанный им производственный опыт был востребован в трудных условиях перехода к рыночным отношениям. В. Е. Храпов и его команда сумели реструктуризировать судоремонтное объединение, положив в основу идею создания мобильного судоремонтного комплекса и диверсификации высвобожденных мощностей на выпуск новой продукции



Юбилеи



*Юбилей*

без остановки производства, что позволило сохранить производственный коллектив численностью около 1000 человек и производственные мощности, которые и до настоящего времени обеспечивают морехозяйственную деятельность.

Опыт проделанной работы обобщен в учебном пособии «Рыночные преобразования на судоремонтном предприятии», актуальность которого не потеряна и в настоящее время. В 2005 г. Владимир Евгеньевич в составе творческой группы стал победителем в номинации «Инженер года» Мурманской области.

В переходный период к рыночной экономике заводскими специалистами во главе с В. Е. Храповым была проделана большая работа по созданию стандартов, пакетов документов по формированию бизнеса в условиях рыночной экономики, что позволило новому судоремонтному комплексу (ОАО «Мурманская судовой верфь — судоремонтно-доковое производство») получить международный сертификат и войти в единую международную систему «Ахиллес», созданную крупнейшими нефтегазовыми компаниями мира, как потенциальный производитель услуг и изделий для их заказов.

В этот период совместно с правительством Мурманской области и депутатами Мурманской областной думы при активном участии Владимира Евгеньевича был запущен пилотный проект создания зоны экономического развития (роста) «Мурманская судовой верфь», что позволило оживить бизнес на данной территории.

После прихода на работу в Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН им была определена научная тематика деятельности, связанная с исследованиями структурных преобразований инфраструктурных предприятий в рыбопромышленном комплексе Северного бассейна, направлениями инновационного развития региональных машиностроительных предприятий с единичным и мелкосерийным производством, управлением, экономикой судоремонтных предприятий в рамках развития региональной экономики и рационального природопользования; малого предпринимательства в промышленном секторе экономики; разработки различных механизмов по устойчивому социально-экономическому развитию региона, пространственного взаимодействия территориальных бизнес-структур и их влияния на социально-экономическое развитие региона.

Богатый производственный опыт позволяет Владимиру Евгеньевичу быть ответственным исполнителем по следующим темам НИР: 2007–2009 гг. «Исследование судоремонтного обеспечения морехозяйственной деятельности»; 2010–2012 гг. «Разработка концепции инновационного развития единичного и мелкосерийного машиностроительного производства в судостроении и судоремонте». На данный период в качестве ответственного исполнителя выполняет работу по теме «Научные и прикладные основы государственной политики функционирования ресурсно-сырьевой экономики на шельфе и в прибрежной зоне Российской Арктики в условиях глобализации».

По совместительству занимается преподавательской деятельностью в Мурманском государственном техническом университете, Мурманской академии экономики и управления,

осуществляет руководство аспирантами, магистрантами и выпускными квалификационными работами студентов.

В результате научных и учебно-методических исследований опубликовано и подготовлено к изданию более 89 научных и учебно-методических работ: из них 12 монографий и учебных пособий, более 30 научных статей.

За время работы В. Е. Храпов проявил себя ответственным, дисциплинированным работником, способным к самостоятельному творческому труду. За долговременный добросовестный труд имеет 68 поощрений, награжден медалью «300 лет Российскому флоту», ему присвоено звание «Заслуженный работник рыбного хозяйства Российской Федерации», награжден почетными грамотами мэра города Мурманска, губернатора Мурманской области, Агентства по рыболовству.

Вежлив и корректен с людьми, чуток и внимателен, пользуется авторитетом.

Поздравляем Владимира Евгеньевича с юбилеем и желаем крепкого здоровья, творческих успехов, удачи во всех начинаниях!



---

*Юбилеи*

---



**Серафим Вениаминович ИКОРСКИЙ**

25.02.1927 — 29.07.2016

29 июля 2016 г. ушел из жизни один из старейших работников Геологического института КНЦ РАН кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Серафим Вениаминович Икорский.

Окончил геологический факультет Воронежского государственного университета в 1957 г. Защитил кандидатскую диссертацию в 1967 г. Работал в Сибири и Воронежской обл. В Геологическом институте с 1959 г. — младший научный сотрудник, старший научный сотрудник (1975 г.), заведующий лабораторией газов и битумов (1980 г.), с 1996 г. — старший научный сотрудник лаборатории геохронологии и геохимии изотопов.

Научные интересы Серафима Вениаминовича были связаны с изучением геохимии изотопов и органического вещества изверженных и метаморфических пород, геохимии благородных газов в разрезе Кольской сверхглубокой скважины и палеозойских щелочных и щелочно-ультраосновных интрузивных комплексов Кольского п-ова.

Им обнаружены и всесторонне исследованы включения битумов в эвдиалите, углеводородных газов в нефелине, впервые рассчитан баланс газов по главным породообразующим минералам интрузивных комплексов Хибинского массива. Результаты исследований обобщены в монографии и кандидатской диссертации. Дальнейшая работа связана с проблемой геохимии эндогенных газов в кристаллических породах Кольского п-ова, а затем и всего мира.

Изобретатель, имел несколько авторских свидетельств. Награжден медалью «За трудовое отличие», серебряной и бронзовой медалями ВДНХ. Автор более 110 научных публикаций, в том числе 4 монографий.

Сотрудники Геологического института КНЦ РАН запомнят Серафима Вениаминовича как доброжелательного, скрупулезного в работе человека, геолога, преданного Кольскому краю.



Научное издание

**ВЕСТНИК КОЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН**

**3/2016(26)**

**Требования к оформлению статей см.:**  
<http://www.kolasc.net.ru/russian/news/vestnik/trebovaniya.pdf>

Редактор А. С. Менделева

Информационная поддержка И. Г. Савчук

Графический и художественный редактор Е. Т. Мартынова

Корректор Е. Н. Еремеева

Технический редактор В. Ю. Жиганов

Подписано к печати 03.10.2016

Формат бумаги 60x84 1/8

Гарнитура Times New Roman

Усл. печ. л. 17.6. Заказ № 31. Тираж 500 экз.

---

*Российская Академия Наук*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Кольский научный центр Российской академии наук  
184209, Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14